

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robotiky

Konstrukční úprava prvního kloubu manipulátoru robotu K3P4

Mechanical Redesign of the K3P4 Robot's First Joint

Student:

Jan Maslowski

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Dominik Heczko

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra robotiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Maslowski**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2301R013 Robotika
Téma: **Konstrukční úprava prvního kloubu manipulátoru robotu K3P4**
Mechanical Redesign of the K3P4 Robot's First Joint
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Analyzujte stávající konstrukční řešení daného kloubu manipulátoru robotu K3P4.
2. Analyzujte současný stav řešené problematiky.
3. Proveďte průzkum pohonů se zpětnou vazbou.
4. Specifikujte požadavkový list.
5. Navrhněte možné varianty řešení a proveďte jejich srovnání.
6. Vybranou variantu detailně rozpracujte.
7. K práci doložte CAD model a výkresovou dokumentaci v rozsahu určeným vedoucím práce.
8. Práci též doložte v elektronické podobě ve formátu MS WORD.

Seznam doporučené odborné literatury:

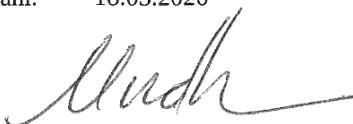
1. KÁRNÍK, Ladislav, Radek KNOFLÍČEK a Jozef NOVÁK-MARCINČIN. Mobilní roboty. Opava: Márfy Slezsko, 2000. ISBN 80-902746-2-5.
2. TALÁCKO, Jaroslav a Robert MATIČKA. Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-01-01291-3.
3. ČSN 01 6910 Úprava dokumentů zpracovaných textovými procesory. Praha: Český normalizační institut, srpen 2014.
4. ČSN ISO 690. Informace a dokumentace – Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Dominik Heczko**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



prof. Dr. Ing. Petr Novák
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 17.5.2020



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 17.5.2020



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Jan Maslowski

Adresa trvalého pobytu autora práce: Petrovice u Karviné 603, 735 72

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

MASLOWSKI, J. Konstrukční úprava prvního kloubu manipulátoru robotu K3P4: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická Univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra Robotiky, 2020, 53s., Vedoucí práce: Ing. Dominik Heczko

Bakalářská práce se zabývá konstrukční úpravou prvního kloubu manipulátoru, který je určen pro studentskou soutěž European Rover Challenge. V úvodu práce je analyzováno současné konstrukční řešení a provedena rešerše obdobných systémů a motorů se zpětnou vazbou. Byl vytvořen požadavkový list a tři varianty řešení přenosu výkonu. Vítězná varianta byla vybrána pomocí vícekritériální analýzy. Ke konstrukčnímu řešení byly doplněny kontrolní výpočty, podrobný 3D model a výkresová dokumentace.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

MASLOWSKI, J. Mechanical Redesign of the K3P4 Robot's First Joint: Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics, 2020, 53p., Head of thesis: Ing. Dominik Heczko

Bachelor thesis deals with redesign of the manipulator's first joint which has been created for the students' competition European Rover Challenge. In the introduction, the current design solution is analysed and research of similar systems and motors with feedback is made. A request list and three variants of the power transmission solution were created. The winning variant was selected by using the multi-criteria analysis. The design solution was supplemented with control calculations, a detailed 3D model and drawing documentation.

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Dominikovi Heczkovi za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vedení bakalářské práce.

Obsah

Seznam použitého značení.....	9
Úvod	11
1 Současný manipulátor	12
1.1 Analýza stavu	13
1.2 Konstrukční řešení.....	13
2 Řešení kloubů obdobných systémů.....	16
2.1 ITU rover team	16
2.2 Cornellmarsrover team – Artemis	17
2.3 AGH Space Systems.....	17
2.4 Robolink, D standard robot joint	18
3 Motory se zpětnou vazbou	19
3.1 Enkodér.....	19
3.2 Dodavatelé elektromotorů se zpětnou vazbou.....	19
3.2.1 Servocity	20
3.2.2 Maxon motor.....	21
3.2.3 Pololu	22
3.2.4 Dunkermotoren	23
4 Požadavkový list.....	24
5 Varianty řešení	25
5.1 Varianta s čelním ozubením	25
5.2 Varianta se šnekovým převodem.....	27
5.3 Varianta s řemenovým převodem.....	28
6 Kriteriaální analýza	30
6.1 Porovnávání kritéria.....	30
6.2 Významnost jednotlivých kritérií	30
6.3 Hodnocení variant	31
6.4 Vítězná varianta.....	32
7 Konstrukce kloubu.....	33
7.1 Celek.....	33
7.2 Nosný profil.....	34
7.3 Podsestava pohonu	34

7.4	Plech pohonu	35
7.5	Krytování	36
7.6	Porovnání původního a nového řešení	38
8	Výpočty.....	39
8.1	Volba převodu	39
8.2	Volba motoru.....	40
8.3	Kontrola hřídele motoru	43
8.4	Výpočet utahovacího momentu šroubů pro aretaci	44
9	Závěr.....	47
	Seznam použité literatury	48
	Seznam obrázků.....	50
	Seznam tabulek	52
	Přílohy.....	53

Seznam použitého značení

Značka	Popis	Jednotka
a	Vzdálenost působíště síly F_r od podpory A	[mm]
a_m	Lineární zrychlení kloubu	[m.s ⁻²]
b	Vzdálenost působíště síly F_r od podpory B	[mm]
d_2	Střední průměr závitu	[mm]
d_D	Průměr díry pro šroub	[mm]
D_s	Střední průměr stykové plochy	[mm]
d_s	Průměr hlavy šroubu	[mm]
f	Součinitel smykového tření pod hlavou šroubu	[-]
F_n	Osová síla v šroubu	[N]
F_r	Radiální síla z řemenového převodu	[N]
F_t	Třecí síla	[N]
f_t	Součinitel smykového tření (hliník-hliník)	[-]
f_z	Součinitel tření v závitu	[-]
i	Převodový poměr řemenového převodu	[-]
J	Moment setrvačnosti hmot manipulátoru	[kg.m ²]
k	Bezpečnost spoje	[-]
M_a	Moment k podpoře A	[Nmm]
M_p	Krouticí moment kloubu	[Nm]
M_p'	Krouticí moment pohonu	[Nm]
M_u	Utahovací moment šroubů	[Nmm]
n	Otáčky kloubu	[min ⁻¹]
n'	Otáčky hřídele pohonu	[min ⁻¹]
P_h	Rozteč závitu	[mm]

r	Vzdálenost těžiště od osy rotace	[mm]
R_b	Reakce v podpoře B	[N]
R_{b10}	Reakce v podpoře B_{10}	[N]
α	Úhel profilu závitu	[°]
ε	Úhlové zrychlení kloubu	[rad.s ⁻²]
φ'	Redukovaný třecí úhel závitu	[°]
ψ	Úhel stoupání závitu	[°]

Úvod

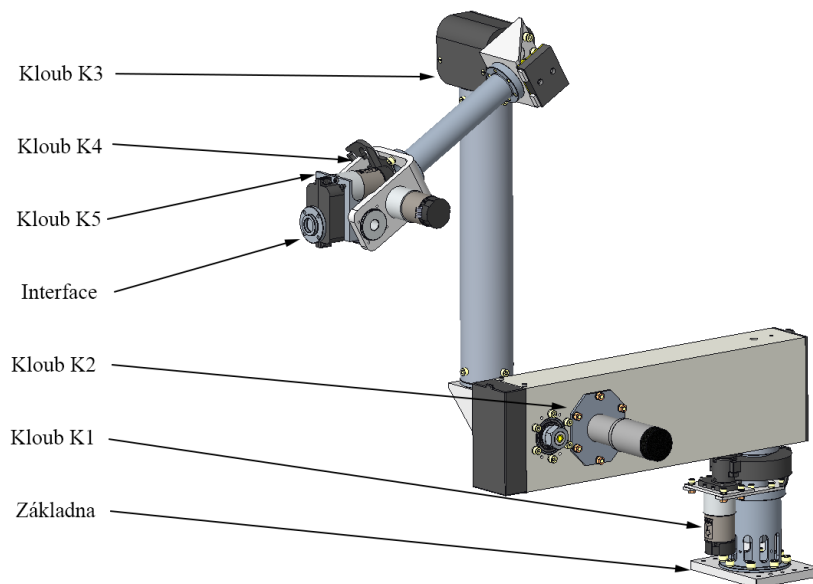
Bakalářská práce se zabývá konstrukční úpravou prvního kloubu manipulátoru, který je součástí robotu K3P4. Robot K3P4 je rover, který je navržen pro účast na mezinárodní soutěži European Rover Challenge. Této soutěže se účastní týmy různých univerzit.

Soutěž roverů je rozdělena do několika disciplín (vědecká úloha, úlohy údržby, sběr předem definovaného předmětu, navigace v terénu). Na splnění některých úloh má významný vliv správná funkce akční nadstavby robotu. Jedná se především o přesné polohování koncového efektoru.

Stávající první kloub manipulátoru má velkou úhlovou vůli. Tento stav má negativní vliv na plnění některých úloh soutěže. Jedná se především o plnění úloh vědeckých, údržby a sběru předmětů, kde je nutná přesná manipulace.

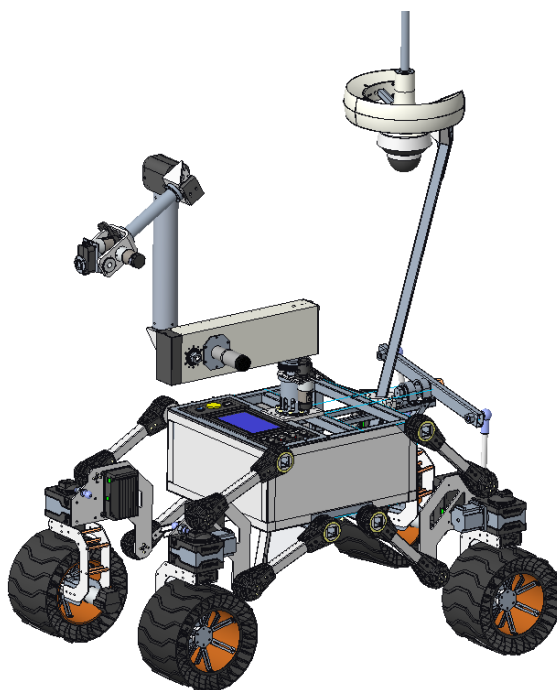
1 Současný manipulátor

Na Obr. 1 lze vidět celý manipulátor a rozmístění jednotlivých kloubů. Manipulátor má 5 stupňů volnosti, všechny klouby jsou rotační a jeho celková hmotnost je 10,1 kg bez objektu manipulace a kabeláže. Manipulátor je navržen pro zatížení do 2 kg. První kloub je umístěn mezi základnou manipulátoru a druhým kloubem.



Obr. 1 Manipulátor robotu K3P4

Na Obr. 2 lze vidět aktuální umístění manipulátoru na robotu K3P4.



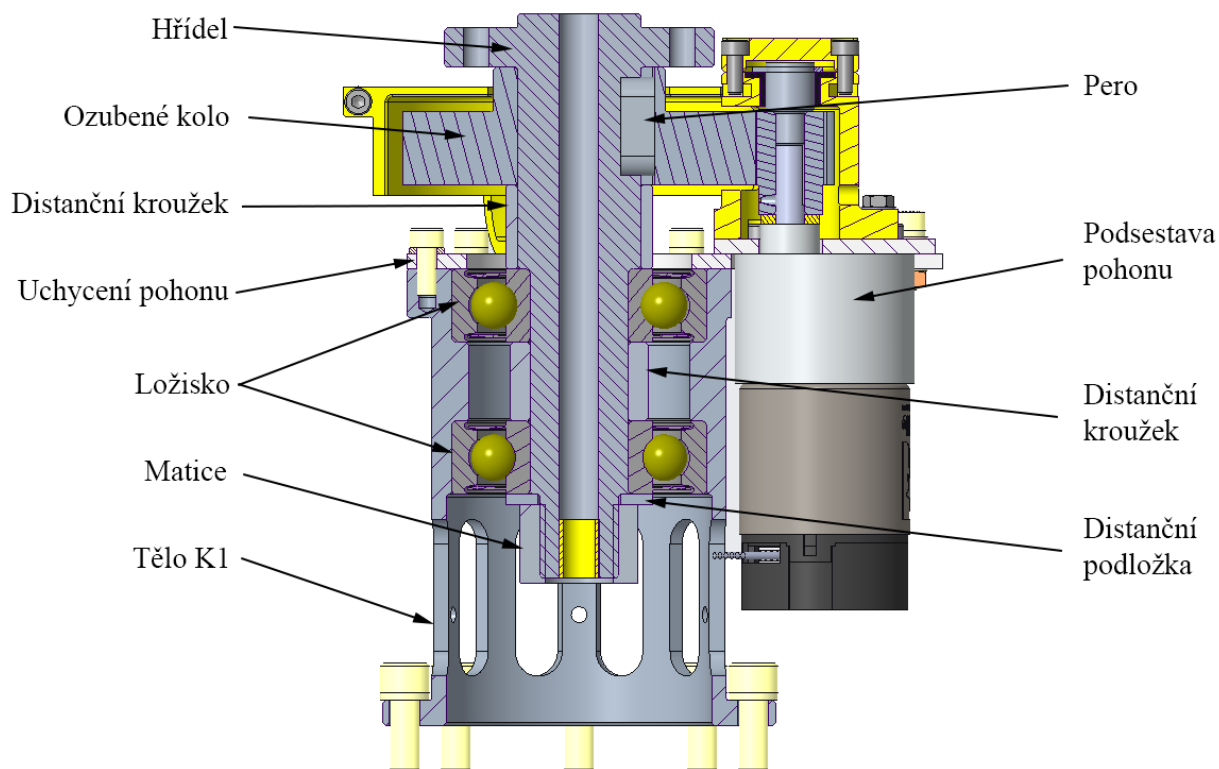
Obr. 2 Rover K3P4

1.1 Analýza stavu

V současné době je první kloub manipulátoru řešen jako čelní ozubení s pohonnou jednotkou od společnosti Pololu. Stávající řešení má problém s přesným polohováním efektoru na konci ramene. Největší nepřesnost vzniká při maximálním vyložení manipulátoru. Hlavní příčinou je velká vůle v převodovce pohonné jednotky a způsob zajištění pastorku na hřídeli pomocí šroubu, ten se během provozu uvolňuje a tím vzniká úhlová vůle mezi pastorkem a hřídeli.

1.2 Konstrukční řešení

První kloub je jako celek tvořen dvěma hlavními sestavami, a to sestavou těla kloubu a sestavou pohonu. Sestava těla obsahuje tělo kloubu, které je tvořeno trubkou s přírubami na obou koncích. Pomocí spodní příruby je tělo přišroubováno ke zbytku roveru a pomocí druhé příruby je přes plech připevněna sestava pohonu. V těle kloubu je dále osazen pár ložisek, který zachycuje klopné momenty a hmotnost zbytku manipulátoru s objektem manipulace. Do těchto ložisek je vložena hřídel, která je přes přírubu přišroubována k druhé ose manipulátoru. Hřídel je zajištěna proti vysunutí pomocí matice. Na hřídeli je pomocí pera umístěno ozubené kolo se 70 přímými zuby. Vzdálenosti mezi ložisky, ozubeným kolem a maticí jsou vymezeny pomocí distančních kroužků.



Obr. 3 Řez prvním kloubem

Druhá hlavní podsestava, podsestava pohonu, je přišroubována pomocí 4 šroubů na nosný plech. V nosném plechu jsou vyfrézovány oválné díry, díky kterým je umožněna montáž a seřízení osové vzdálenosti ozubení. Na hřídeli průřezu ve tvaru písmene D vystupující z převodovky motoru je připevněn pastorek s 16 zuby pomocí červíku. Pro redukci klopného momentu z radiální síly ozubení je z druhé strany do pastorku vložena hřídelka. Hřídelka je zajištěna pojistným kroužkem a je uložena v kluzném pouzdře v horním krytu pohonu. Kryt je vytištěn z plastu za pomoci 3D tisku.

Pro pohon kloubu je použit motor Pololu Metal Gearmotor 37Dx73L. Jedná se o stejnosměrný kartáčový motor osazený převodovkou. Základní parametry pohonu jsou uvedeny v Tab. 1.

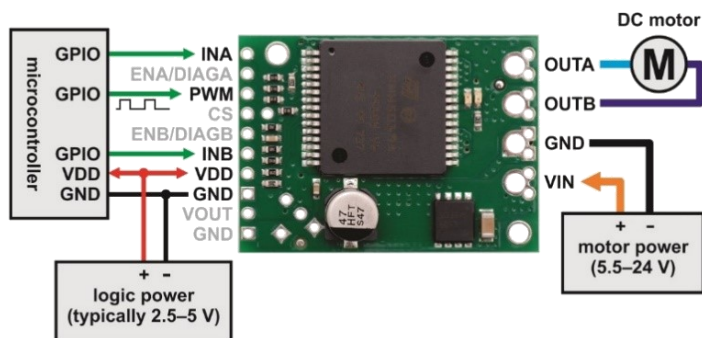


Obr. 4 Motor Pololu Metal Gearmotor 37Dx73L [1]

Tab. 1 Parametry Pololu Metal Gearmotor 37Dx73L [1]

Parametr	Hodnota
Napájení	12 V
Proud	5 A (špička)
Převodový poměr	150:1
Otáčky naprázdno	67 min ⁻¹
Krouticí moment	1,76 Nm
Rozlišení enkodéru	64 pulsů / otáčka motoru
Cena	832 Kč

Pro určení aktuální rychlosti otáčení hřídele motoru a polohy natočení kloubu je v pohonné jednotce využit zabudovaný inkrementální enkodér. Zpracování dat ze senzoru zajišťuje řídicí mikrokontroler celého manipulátoru Arduino Due. Pro řízení výkonových parametrů motoru je použit kontroler DC motorů VNH5019 Motor Driver Carrier od společnosti Pololu. Jeho základní parametry jsou uvedeny v Tab. 2.



Obr. 5 Zapojení kontroleru [1]

Tab. 2 Parametry kontroleru VNH5019 [1]

Parametr	Hodnota
Operační napětí	5,5 – 24 V
Napájecí napětí	2,5 – 5 V
Kontinuální odběr	12 A
Špičkový odběr	30 A
PWM frekvence	20 kHz
Cena	520 Kč

2 Řešení kloubů obdobných systémů

V této kapitole je provedena rešerše konstrukčních řešení obdobných systémů, které se používají na konkurenčních roverech a v průmyslových aplikacích.

2.1 ITU rover team

Na všech kloubech manipulátoru je použit stejný převod. Kloub je složen z půlené hliníkové skříně, která obsahuje šnekový mechanismus. K převodu je připojen stejnosměrný kartáčový motor. Další konstrukce manipulátoru je připojena pomocí karbonových dílů. Díky samosvornosti mechanismu je manipulátor zabezpečen proti samovolnému pohybu při ztrátě napájení [2]. Mechanismus je zobrazen na Obr. 6. Základní parametry celého manipulátoru jsou uvedeny v Tab. 3.



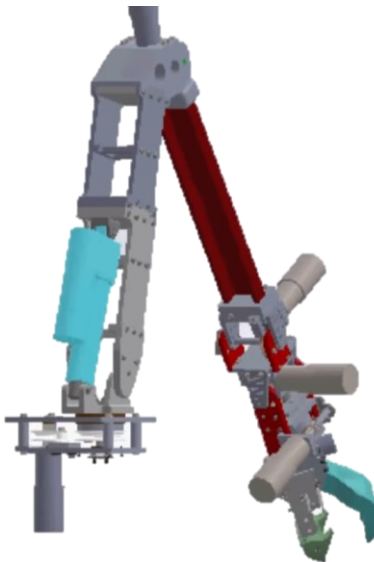
Obr. 6 Rozklad šnekového mechanismu kloubu [2]

Tab. 3 Základní parametry manipulátoru [2]

Parametr	Hodnota
Počet stupňů volnosti	6
Nosnost	5 kg
Maximální dosah	130 cm

2.2 Cornellmarsrover team – Artemis

Manipulátor má jeden kloub poháněn přes ozubený řemen, který minimalizuje vůli v kloubu. Druhý kloub je poháněn lineárním aktuátorem. Třetí kloub a orientační ústrojí je řešeno pomocí šnekového převodu. Pro pohon rotačních kloubů je použit stejnosměrný kartáčový motor značky Robotzone [3]. Manipulátor je zobrazen na Obr. 7.



Obr. 7 Manipulátor roveru Artemis [3]

2.3 AGH Space Systems

První kloub je řešen pomocí čelního ozubení. Kolo převodu je připevněno k základně manipulátoru, pastorek je osazen na hřídeli stejnosměrného motoru, který je umístěn na zbývající konstrukci manipulátoru a otáčí se tak společně s celým manipulátorem. Druhý až čtvrtý kloub je poháněn lineárním motorem. Pátý kloub je z převodován opět pomocí čelního ozubení [4]. Pohled na převod prvního kloubu je zobrazen na Obr. 8.

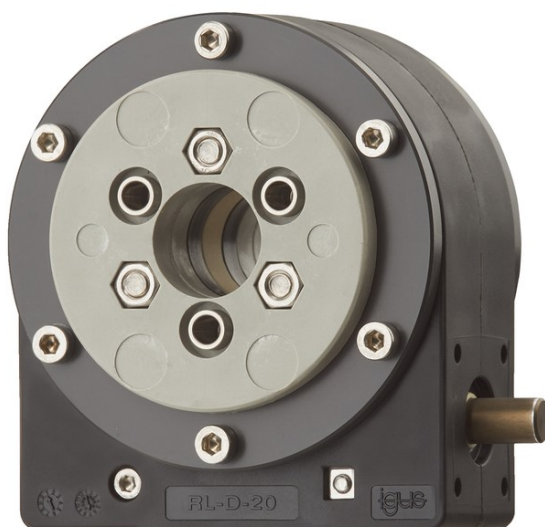
A close-up photograph of the first joint mechanism of a robotic manipulator. It shows a grey metal housing with a black cylindrical motor mounted on top. A large black gear is visible, connected to a smaller gear on the motor's shaft. The mechanism is mounted on a white base. A small logo with the letters 'AGH' is visible on the white base.

Obr. 8 Detail mechanismu kloubu [5]

17

2.4 Robolink, D standard robot joint

Robolink je modulární systém výrobce Igus pro snadnou a levnou automatizaci některých manuálních procesů. Systém se skládá z rotačních kloubů a spojovacích součástí různých velikostí. Spojení jednotlivých kloubů poté vytvoří manipulátor pro konkrétní aplikaci. Robot joint RL-D-20-101 je nejmenší kloub z nabízené řady, je zobrazen na Obr. 9. V kloubu je pro převod krouticího momentu z motoru na osu otáčení použit šnekový převod, který je vyroben z eloxovaného hliníku. Díky použití šnekového převodu je kloub samosvorný. Pro pohon kloubu jsou použity krokové motory a jejich snadnou montáž zajišťují přizpůsobené příruby kloubu [6]. Základní parametry kloubu jsou uvedeny v Tab. 4.



Obr. 9 Robolink, D standard robot joint [6]

Tab. 4 Parametry Robot joint [6]

Parametr	Hodnota
Převodový poměr	1:38
Přípustný stálý výstupní krouticí moment	5 Nm
Vůle na výstupní hřídeli	<0,5°
Účinnost převodu	0,4
Hmotnost	0,41 kg

3 Motory se zpětnou vazbou

Pro možnost řízení výkonových parametrů kloubu a jeho polohování je zapotřebí, aby z pohonné jednotky kloubu byla zavedena zpětná vazba polohy a rychlosti otáčení do řídicí jednotky.

3.1 Enkodér

Enkodér je digitální senzor, který se nejčastěji používá jako senzor polohy. Enkodéry dělíme na absolutní, které udávají přesnou polohu a inkrementální, které udávají pouze její změnu. Absolutní enkodéry jsou oproti inkrementálním konstrukčně složitější, a proto jsou zpravidla dražší a méně rozšířené [7].



Obr. 10 Detail kódovacího kolečka inkrementálního rotačního enkodéru [7]

Optický enkodér je tvořen průsvitným diskem s optickými závorami, zdrojem světla a optickým snímačem. Při rotaci disku je světelný paprsek ze zdroje světla do fotosnímače přerušován v závislosti na rychlosti otáčení a přesnosti enkodéru. Výstupem z enkodéru jsou pak dva signály obdélníkového průběhu s fázovým posunutím 90° . Připojené měřicí zařízení následně z frekvence pulzů spočítá aktuální rychlost. Při porovnání žádané rychlosti a aktuální rychlosti může zařízení provést akční zásah do výkonu motoru [7].

3.2 Dodavatelé elektromotorů se zpětnou vazbou

Pro lepší přehled o aktuálním stavu a získání podrobnějších informací o elektromotorech se zpětnou vazbou byl proveden průzkum mezi dodavateli pohonů. Do průzkumu byli zahrnuti i dodavatelé, jejichž produkty byly již použity v aplikacích realizovaných v rámci katedry robotiky.

3.2.1 Servocity

Servocity je online obchod, který poskytuje různé mechanické komponenty a elektroniku pro použití v robotice, modelářství a videoprodukcí. Jeho nabídka elektromotorů s převodovkami je rozdělena do tří výkonových řad, a to lehkou, standartní a těžkou. Převodovky jsou buď planetové nebo s čelním ozubením. Ke každému motoru Servocity poskytuje provozní parametry a výkresy. Jednotlivé 3D modely lze získat pomocí odkazu z cloudového úložiště Dropbox, který je uveden na stránkách společnosti [8]. Jako příklad byl zvolen pohon 52 RPM Premium Planetary Gear Motor [9].



Obr. 11 Motor Servocity 52 RPM Premium Planetary Gear Motor [9]

Tab. 5 Parametry Servocity 52 RPM Premium Planetary Gear Motor [9]

Parametr	Hodnota
Typ motoru	DC, kartáčový
Nominální napětí	12 V
Maximální proud	4,9 A
Otáčky naprázdno	52 min ⁻¹
Maximální krouticí moment	2,06 Nm
Typ převodovky	Planetová
Převodový poměr	231:1
Cena	49,99 \$

3.2.2 Maxon motor

Maxon je švýcarská společnost zabývající se vývojem a stavbou elektrických pohonů. Jde o jednoho ze světových výrobců elektro pohonů. Pohony Maxon se používají například v srdečních pumpách, chirurgických nástrojích, letadlech, objektivách a dalších aplikacích. Poskytují širokou škálu motorů a převodovek, které lze různě kombinovat k dosažení požadovaných parametrů. Motory lze volit se senzory i s brzdami. Na oficiálních stránkách společnosti je přístupný konfigurátor, který sestaví vhodné kombinace motorů a převodovek dle specifického zadání. Ke zvolené kombinaci jsou uvedeny provozní parametry, přípojně rozměry a 3D model [10]. Jako příklad pohonu byla zvolena kombinace motoru, převodovky a enkodéru DC-max22S GB SL 12V, GPX26 A 231:1, ENX10 EASY 512IMP [11].



Obr. 12 Motor a převodovka Maxon [11]

Tab. 6 Parametry motoru Maxon [11]

Parametr	Hodnota
Typ motoru	DC, kartáčový
Nominální napětí	12 V
Maximální proud	4,9 A
Otáčky naprázdno	52 min ⁻¹
Maximální krouticí moment	2,06 Nm
Typ převodovky	Planetová
Převodový poměr	231:1
Cena	289,27 €

3.2.3 Pololu

Pololu je dodavatel, výrobce elektroniky a strojních komponent. Jeho sortiment zahrnuje produkty od senzorů a elektroniky řízení pohybu, přes motory a kola, až po kompletní roboty. Nabídka rotačních pohonů obsahuje výkonovou škálu od 0,25 W až po motory s výkonem 14 W. Motory jsou k dispozici ve verzi s rotačním enkodérem i bez něj. Na webových stránkách jsou uvedeny základní technické parametry, výkresy i 3D modely pro jednotlivé motory [12]. Jako příklad byl zvolen pohon 131:1 Metal Gearmotor 37Dx73L mm 12V [13].



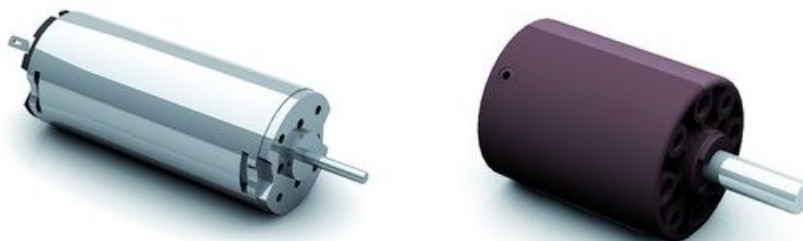
Obr. 13 Motor společnosti Pololu [13]

Tab. 7 Parametry motoru Pololu [13]

Parametr	Hodnota
Typ motoru	DC, kartáčový
Nominální napětí	12 V
Maximální proud	5,5 A
Otáčky naprázdno	76 min ⁻¹
Maximální krouticí moment	4,41 Nm
Typ převodovky	Čelní ozubení
Převodový poměr	131:1
Cena	39,95 \$

3.2.4 Dunkermotoren

Dunkermotoren je německá společnost, která vyvíjí a vyrábí pohony pro přesné aplikace. Vyrábí stejnosměrné kartáčové motory, bezkartáčové motory a střídavé motory. K motorům dodává širokou škálu planetových a šnekových převodovek, k nimž lze připojit i rotační enkodéry a brzdy. Na webových stránkách se nachází aplikace pro konfiguraci celého pohonu na základě vstupních parametrů. Ke zvolené konfiguraci jsou k dispozici provozní parametry, rozměrové informace a 3D model ke stažení. V konfiguratoru společnost nabízí výkonovou škálu od 2,3 W až do 1127 W [14]. Jako příklad pohonu byla zvolena kombinace motoru, převodovky a enkodéru G30.0 [15], PLG30 [16], RE 30-2-500 [17].



Obr. 14 Motor a převodovka Dunkermotoren [15]

Tab. 8 Parametry motoru společnosti Dunkermotoren [15]

Parametr	Hodnota
Typ motoru	DC, kartáčový
Nominální napětí	12 V
Maximální proud	4,5 A
Otáčky naprázdno	59,6 min ⁻¹
Maximální krouticí moment	5,23 Nm
Typ převodovky	Planetová
Převodový poměr	50:1
Cena	Nezveřejněna

4 Požadavkový list

Na konstrukci nového kloubu byly stanoveny tyto požadavky:

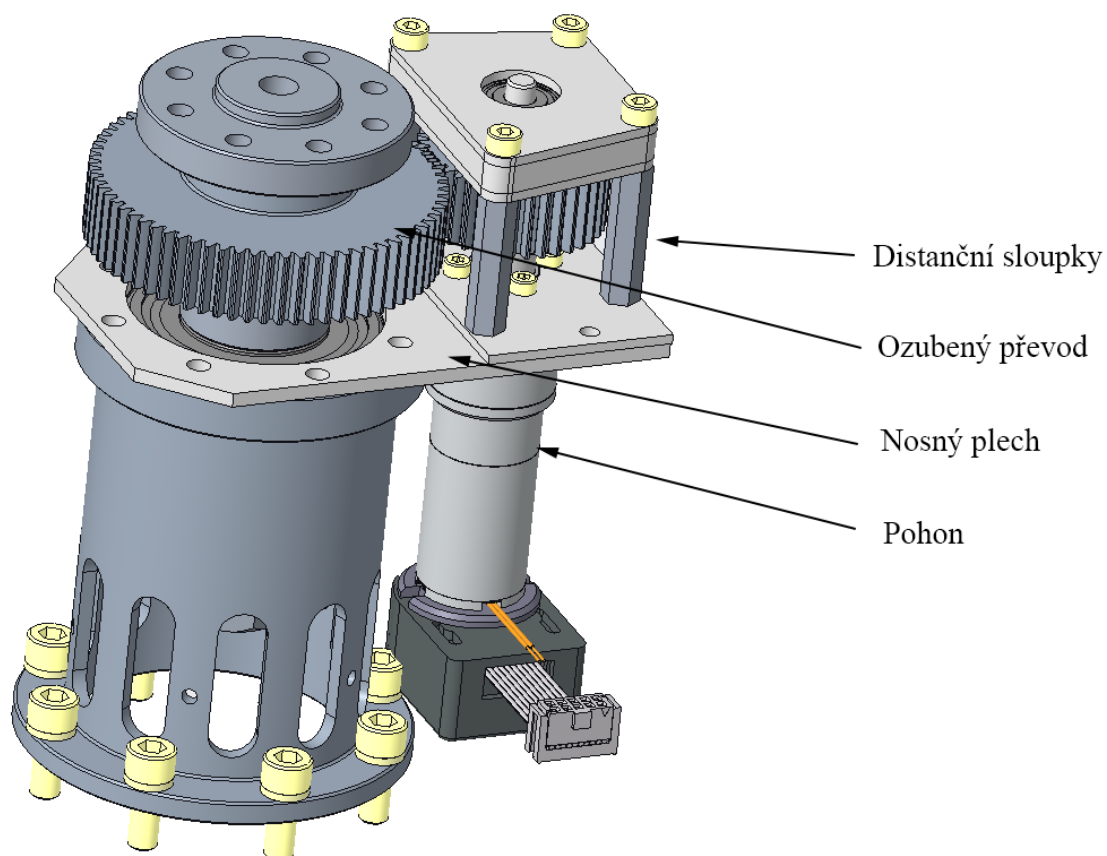
- minimalizovat vůli tak, aby se zlepšila přesnost manipulace,
- pro pohon musí být použit stejnosměrný kartáčový motor, aby bylo zachováno jednoduché řízení pomocí DC driveru,
- napájecí napětí zvoleného DC motoru musí být 12 V nebo 24 V z důvodu mobilního systému napájeného lithium-polymer bateriemi,
- zachování přípojných rozměrů z důvodu kompatibility s již vyrobenými díly manipulátoru,
- z kloubu musí být vedena zpětná vazba rychlosti otáčení z důvodů řízení manipulátoru,
- stejná nebo nižší hmotnost kloubu, než je hmotnost kloubu původního,
- zajištění snadné montáže kloubu.

5 Varianty řešení

Na základě získaných informací při rešerši obdobných systémů byly vytvořeny tři varianty řešení. Každá varianta s jiným druhem přenosu krouticího momentu z hřídele motoru na osu kloubu. Tyto varianty byly rozpracovány do takové podoby, aby je bylo možné následně porovnat.

5.1 Varianta s čelním ozubením

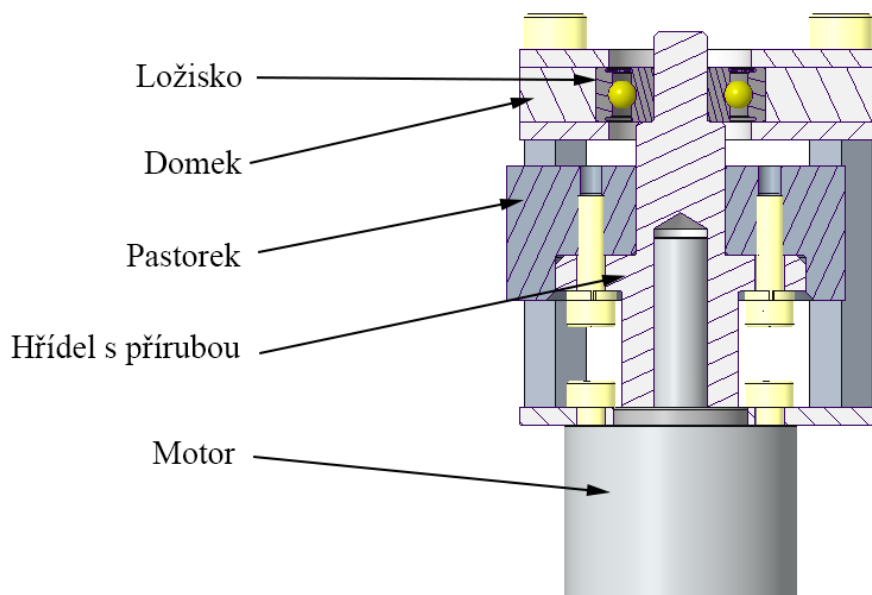
Jedná se o podobnou konstrukci současnému stavu. Pro přenos výkonu z motoru na kloub bylo použito čelní ozubení. Převodové kolo je osazeno na hřídeli první osy pomocí pera.



Obr. 15 Sestava varianty s čelním ozubením

Pastorek ozubení je přišroubován přes přírubu k hřídeli, která je z jedné strany vsazena na hřídel motoru a na druhé straně je uložena v jednořadém kuličkovém ložisku pro snížení účinků radiální síly z ozubení na hřídel motoru. Podsestava pohonu je přišroubována k nosnému plechu pomocí čtyř šroubů. V nosném plechu jsou vytvořeny oválné díry pro snadnou montáž a seřízení osové vzdálenosti. Ložisko je uloženo v ložiskovém domku, který

tvorí tři plechové součásti. Prostřední plech má shodnou tloušťku s šířkou ložiska. Horní a spodní plech slouží pouze k axiálnímu zajištění. Celý domek je přišroubován pomocí čtyř šroubů k šestihranným distančním sloupkům. Sloupky zajišťují správnou vzdálenost pro montáž hřídele, jejich druhý konec je přišroubován k plechu pohonu.

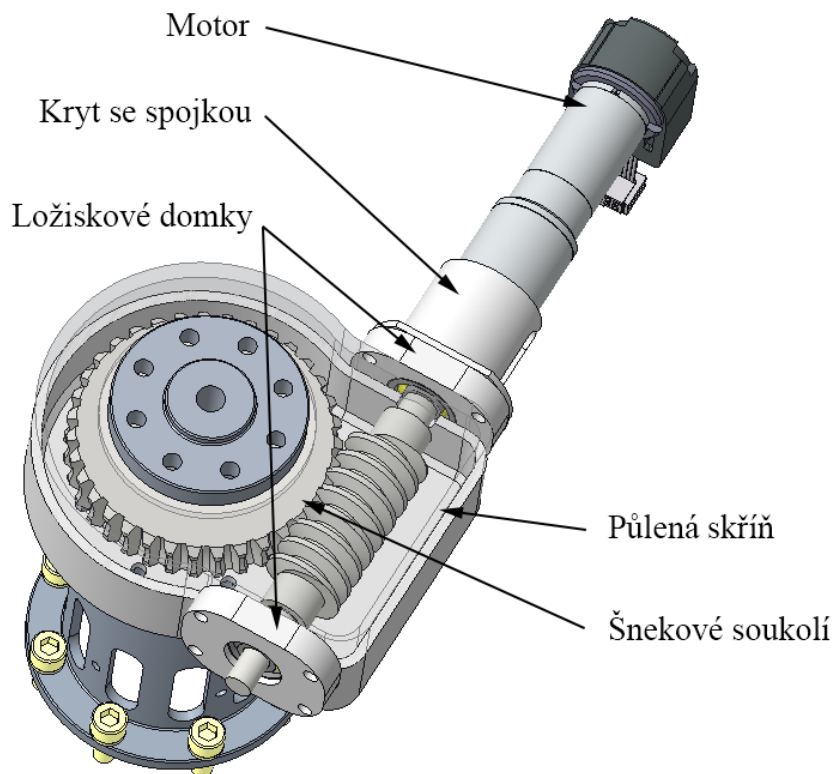


Obr. 16 Řez pohonem varianty s čelním ozubením

Výhodami tohoto řešení jsou jeho velmi malé zástavbové rozměry a jednoduchost konstrukce. Nevýhodou je obtížné seřízení osové vzdálenosti tak, aby se vymezila vůle a zároveň nedošlo k nadměrnému namáhání hřídele a zhoršení celkové účinnosti přenosu výkonu.

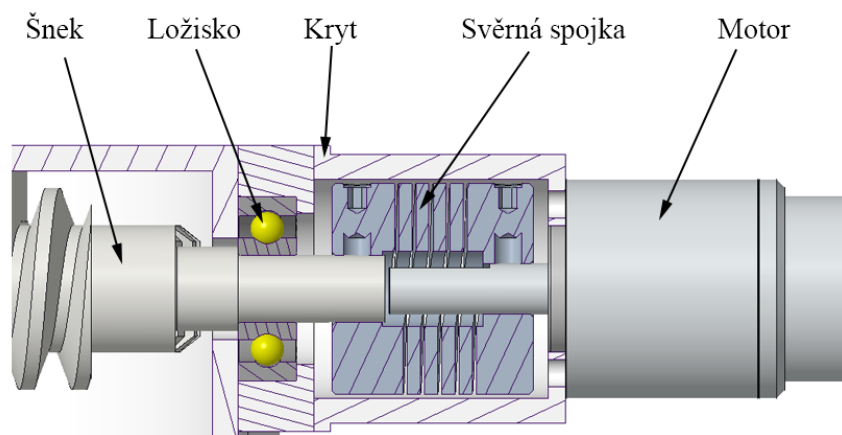
5.2 Varianta se šnekovým převodem

Pohyb kloubu je zajištěn přes šnekové soukolí. Ozubené kolo je umístěno na hřídeli kloubu, přenos krouticího momentu je zajištěn pomocí pera. Hřídel se šnekem je uložena do dvou ložiskových domků po obou stranách.



Obr. 17 Varianta se šnekovým převodem

Hřídele šneku a motoru jsou spojeny pomocí spojky se svěrným spojením. Spojka je zakrytována krytem, který je zároveň nosným prvkem motoru. Celá skříň převodu je přišroubována spodní části k tělu prvního kloubu.

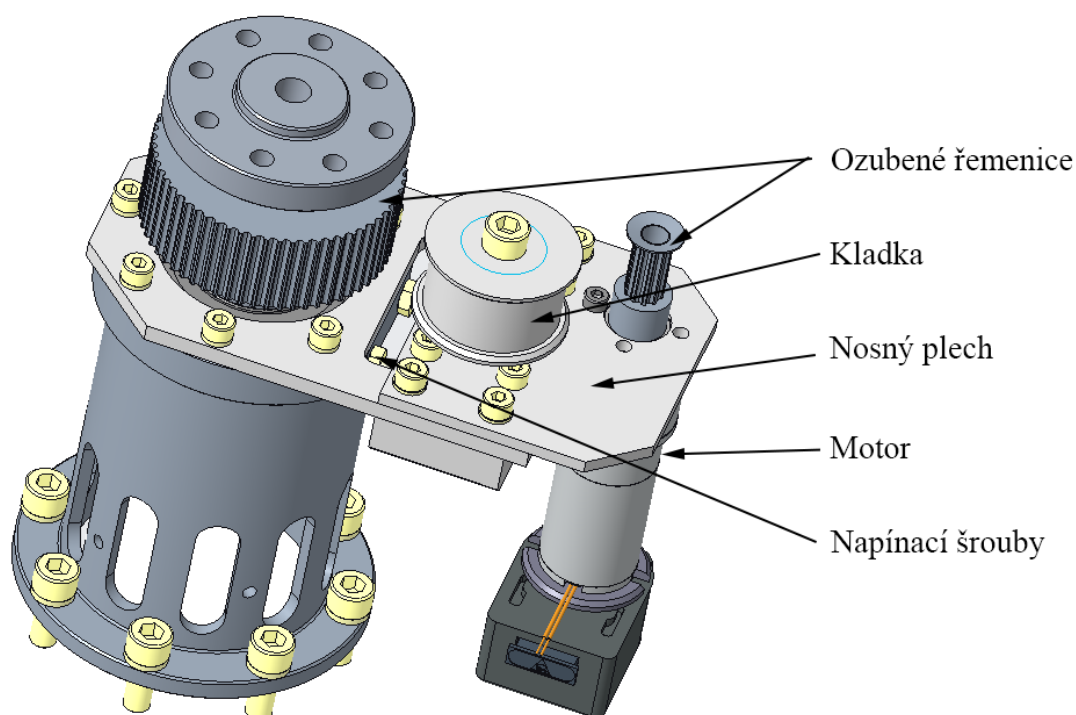


Obr. 18 Řez sestavou pohonu

Výhodou tohoto řešení je velký převodový poměr. Samosvornost mechanismu by zajistila blokadu vůči samovolnému pohybu, např. složkou tíhové síly, ale znemožnila by manuální otáčení kloubu. Vůle mechanismu by byla ovlivněna pouze vůlí šnekového převodu. Nevýhodou tohoto řešení je nutnost přesné výroby skříně převodovky tak, aby nevznikla velká odchylka od požadované osové vzdálenosti.

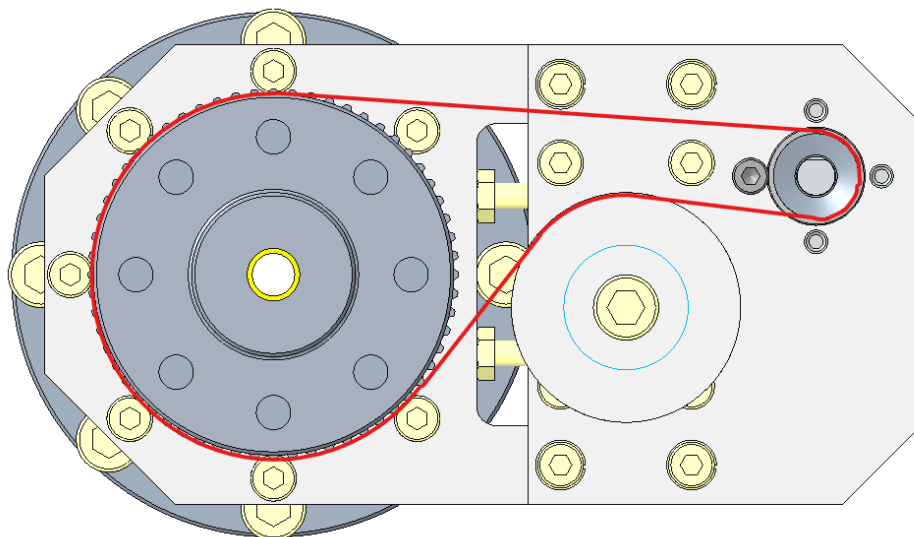
5.3 Varianta s řemenovým převodem

Přenos výkonu je realizován pomocí řemenového převodu. Je použit ozubený HTD řemen pro jeho vysokou účinnost a vysokou míru ohebnosti, což umožňuje použití malých řemenic. Větší řemenice je zajištěna na hřídeli kloubu pomocí pera, menší řemenice je vsazena na hřídeli motoru. Pro zvýšení úhlu opásání je použita bezzubá kladka se zabudovanými kuličkovými ložisky. Vedení řemene je zobrazeno červenou čarou na Obr. 20. Systém napínání řemene je řešen pomocí hliníkového bloku, do kterého je přišroubován motor a napínací kladka. Celý blok se posouvá vůči ose prvního kloubu v oválných drážkách nosného plechu.



Obr. 19 Varianta s použitím ozubeného řemene

Pro vyvození potřebné síly k napínání jsou v bloku umístěny dva šrouby, které se opírají o tělo kloubu. Zajištění předepnuté polohy je řešeno dotažením šroubů v oválných drážkách, tyto šrouby poté sevrou nosný plech a vzniklé tření zabrání posuvu pohonu.



Obr. 20 Vedení řemene

Výhodou tohoto řešení je možnost manuálního otáčení kloubu a snadná výroba. Nevýhodou je velká radiální síla působící na hřídel motoru od provozních sil převodu.

6 Kriteriaální analýza

Po dokončení jednotlivých variant bylo potřeba je porovnat a zvolit variantu, která bude dále detailně rozpracována. K porovnání variant byla použita vícekriteriaální analýza.

6.1 Porovnávaná kritéria

Vícekriteriaální analýza porovnává varianty v předem stanovených kritériích, která jsou důležitá pro danou oblast aplikace. Proto bylo zvoleno těchto 5 kritérií, která jsou uvedena v Tab. 9. Stupnice hodnocení je uvedena v Tab. 10.

Tab. 9 Porovnávaná kritéria

Kritéria	Popis
K1	Přesnost mechanismu
K2	Odhadované celkové náklady
K3	Náročnost výroby
K4	Zastavěný prostor
K5	Předběžná hmotnost

Tab. 10 Stupnice hodnocení

Hodnocení	Popis
1	Nejhorší stav
2	Průměrný stav
3	Nejlepší stav

6.2 Významnost jednotlivých kritérií

Jednotlivá kritéria byla nejprve porovnána mezi sebou metodou nejmenších trojúhelníkových párů. Pokud bylo jedno kritérium důležitější než druhé, bylo mu přiřazeno ohodnocení jednoho bodu. Pokud však byla kritéria stejně důležitá nebo nebylo možné mezi nimi rozhodnout, bylo každému kritériu přiřazeno ohodnocení půl bodu. Takto byla mezi sebou porovnána všechna kritéria. Výsledný součet všech bodů pro jednotlivá kritéria určil jejich pořadí. Díky pořadí byla u každého kritéria určena váha jeho významnosti, která nabývá hodnot v rozmezí 1 až 2. Čím vyšší číslo, tím vyšší významnost kritéria. Významnost kritérií je uvedena v Tab. 11.

Tab. 11 Významnost jednotlivých kritérií

Porovnávané páry				Počet voleb	Pořadí	Významnost	Kritérium
K1	K1	K1	K1	3	1	2	K1
K2	K3	K4	K5				
	K2	K2	K2	1,5	4	1,25	K2
	K3	K4	K5				
		K3	K3	2	3	1,5	K3
		K4	K5				
			K4	1	5	1	K4
			K5				
				2,5	2	1,75	K5

6.3 Hodnocení variant

Po stanovení významnosti jednotlivých kritérií byly porovnány samotné varianty. Nejlepšímu možnému stavu byla přiřazena hodnota 3, průměrnému stavu hodnota 2 a nejhoršímu stavu hodnota 1. Jednotlivé hodnoty byly vynásobeny s významností daného kritéria, tím byl získán hodnotový index. Suma hodnot těchto indexů určila vhodnost celého řešení, čím vyšší hodnoty indexu varianta dosáhla, tím vhodnější je. Hodnocení jednotlivých variant je uvedeno v následujících tabulkách.

Tab. 12 Hodnocení varianty s ozubeným převodem

Kritéria	Významnost k.	Hodnota	Index
K1	2	2	4
K2	1,75	2	3,5
K3	1,25	2	2,5
K4	1	3	3
K5	1,5	2	3
Suma:			16

Tab. 13 Hodnocení varianty se šnekovým převodem

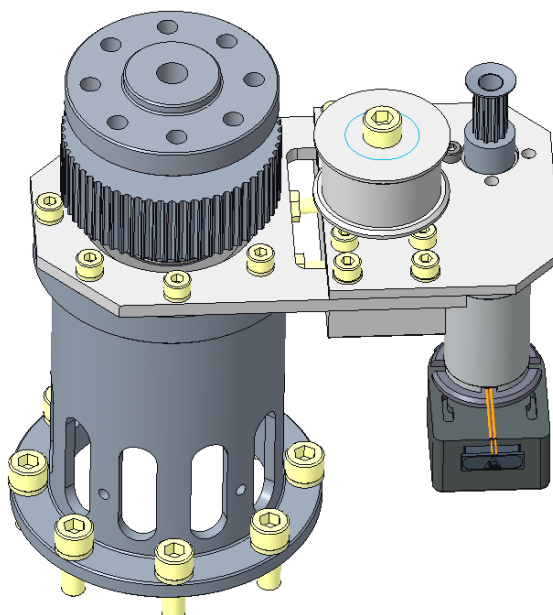
Kritéria	Významnost k.	Hodnota	Index
K1	2	1	2
K2	1,75	2	3,5
K3	1,25	1	1,25
K4	1	1	1
K5	1,5	1	1,5
Suma:			9,25

Tab. 14 Hodnocení varianty s použitím řemene

Kritéria	Významnost k.	Hodnota	Index
K1	2	2	4
K2	1,75	2	3,5
K3	1,25	2	2,5
K4	1	2	2
K5	1,5	3	4,5
Suma:			16,5

6.4 Vítězná varianta

Podle výsledků kritériální analýzy se vítěznou variantou stala varianta s použitím ozubeného řemene s celkovým součtem 16,5 bodů. Tato varianta byla dále detailně rozpracována.



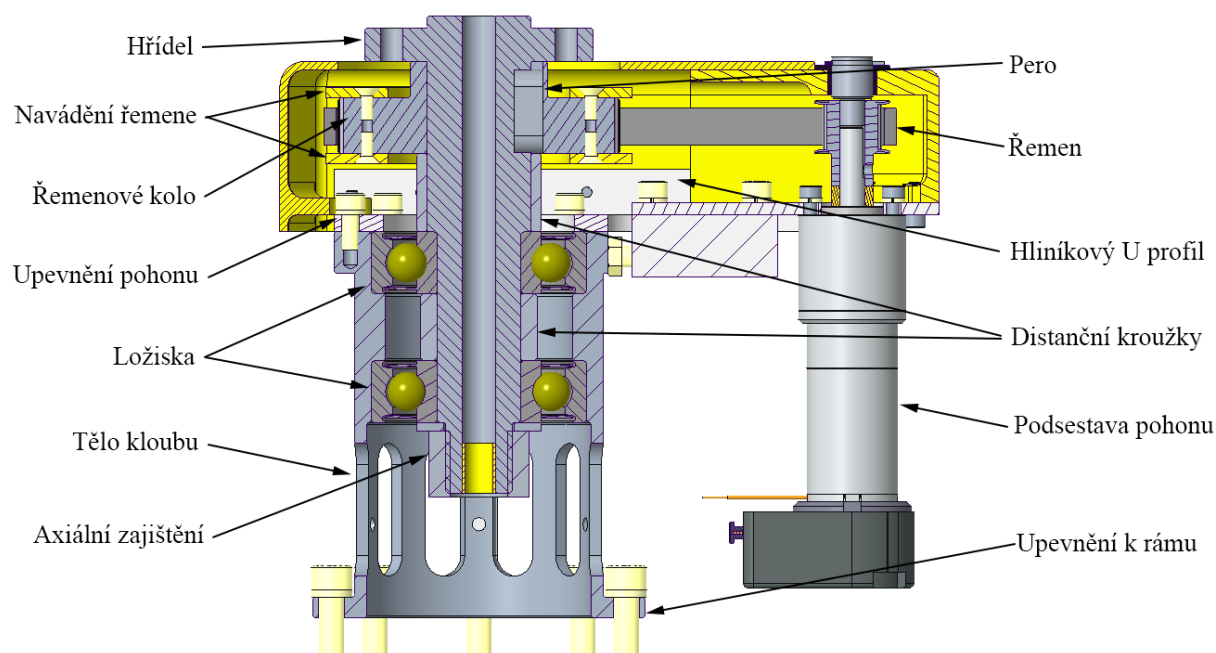
Obr. 21 Vítězná varianta

7 Konstrukce kloubu

Tato část se zabývá konstrukcí vítězné varianty řešení kloubu.

7.1 Celek

Mechanická část navrženého řešení je tvořena ocelovou hřídelí, která je uložena ve dvou kuličkových ložiscích 6304. Ložiska jsou vsazena do těla kloubu. Tělo kloubu je vyrobeno jako hliníkový obrobek s přírubami na obou koncích. Horní příruba obsahuje sedm závitových děr M4, k nimž je přišroubován upravený hliníkový profil, který je hlavní nosnou součástí podstavy pohonu. Tento celek je spojen s tělem robota prostřednictvím spodní příruby a osmi šroubů M6. Na hřídeli je osazena hliníková řemenice pro HTD řemen. Řemenice má 72 zubů, v jejím otvoru je vytvořena drážka pro pero. Poloha řemenice je na hřídeli vymezena pomocí distančního kroužku umístěného mezi řemenicí a ložiskem. Druhá strana řemenice je opřena o přírubu na konci hřídele, ve které je vyfrézována drážka pro pero.

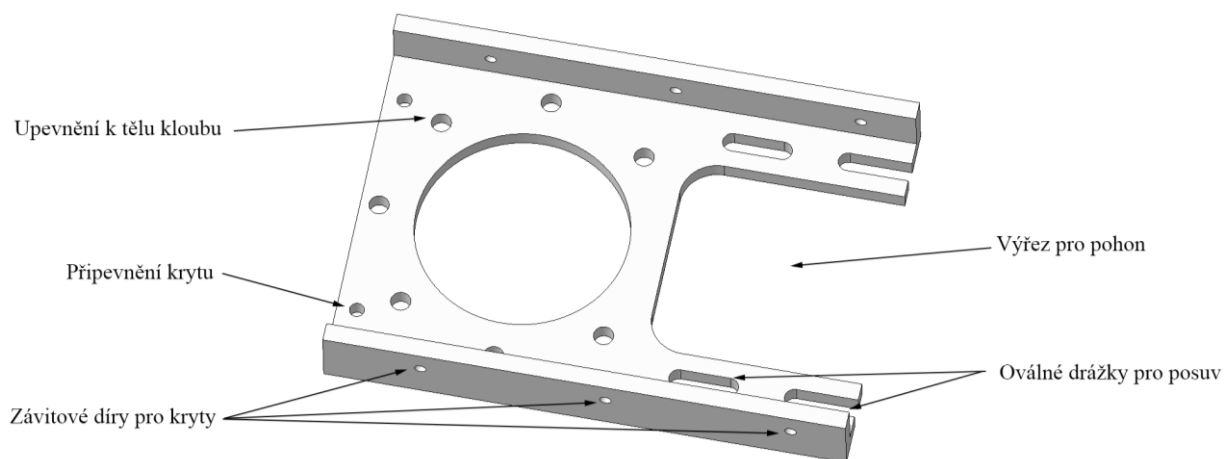


Obr. 22 Řez celým kloubem

V nabídce společnosti T.E.A. Technik s.r.o. jsou ozubené řemenice s počtem 72 zubů bez navádění řemene, proto bylo zapotřebí tuto řemenici upravit tak, aby při chodu mechanismu nedošlo k uvolnění řemene z kola. V řemenici tak bylo vytvořeno 6 závitových děr M3 pro šrouby. Do těchto děr jsou z obou stran přišroubována plastová mezikruží zhotovená pomocí 3D tisku. Po smontování plastové díly slouží pro navádění řemene.

7.2 Nosný profil

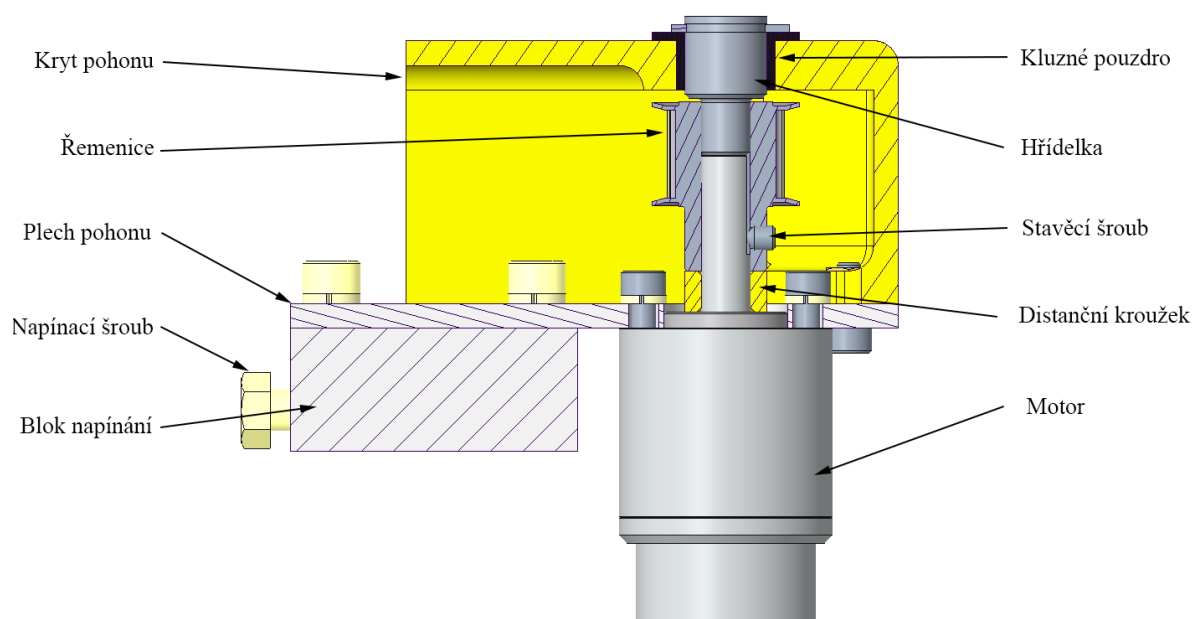
Hlavní nosnou součástí podstavy pohonu je upravený hliníkový U profil o rozměrech 80 x 40 mm se silou stěny 4 mm. Profil byl zvolen oproti plechu použitým v návrhu varianty z důvodu lepší odolnosti při namáhání v ohybu. Do profilu je vyvrtána díra o průměru 46 mm pro průchod hřídele osy kloubu a pro axiální zajištění kuličkového ložiska. Dále je vyvrtáno sedm děr pro připevnění profilu k tělu kloubu pomocí šroubů M4. Na stejném konci profilu jsou dvě díry pro upevnění krytu pomocí šroubů M3. Na druhém konci profilu je vyfrézován otvor pro podstavu pohonu, po stranách otvoru jsou vytvořeny čtyři oválné drážky, ve kterých se podstava pohonu pohybuje. Drážky umožňují posuv pohonu až o 10 mm. Po obou stranách profilu jsou tři závitové díry M3 pro přichycení plastových krytů.



Obr. 23 Upravený U profil

7.3 Podstava pohonu

Podstava pohonu je výkonová část kloubu. Její hlavní součástí je tedy motor a blok pro napínání. Motor je připevněn přes přírubu planetové převodovky k plechu pohonu pomocí čtyř šroubů M3. Výstupní hřídel motoru má průřez ve tvaru písmene D a má průměr 6 mm. Na této hřídeli je osazena ozubená hliníková řemenice s 16 zuby. Pro srovnání výškového rozdílu mezi jednotlivými řemenicemi je mezi řemenicí a přírubou motoru vložen distanční kroužek o výšce 5 mm. V řemenici je vytvořena závitová díra pro stavěcí šroub, pomocí kterého je řemenice zajištěna. Aby nedošlo během provozu k uvolnění řemenice, je při dotažení šroubu do závitu nanášeno lepidlo k trvalému upevnění spoje. Z druhé strany řemenice je nalisována hřídelka, aby napomáhala k redukci klopného momentu vzniklého z provozních sil řemenového převodu. Druhý konec hřídelky je uložen v kluzném pouzdře a axiálně zajištěn pomocí pojistného kroužku.

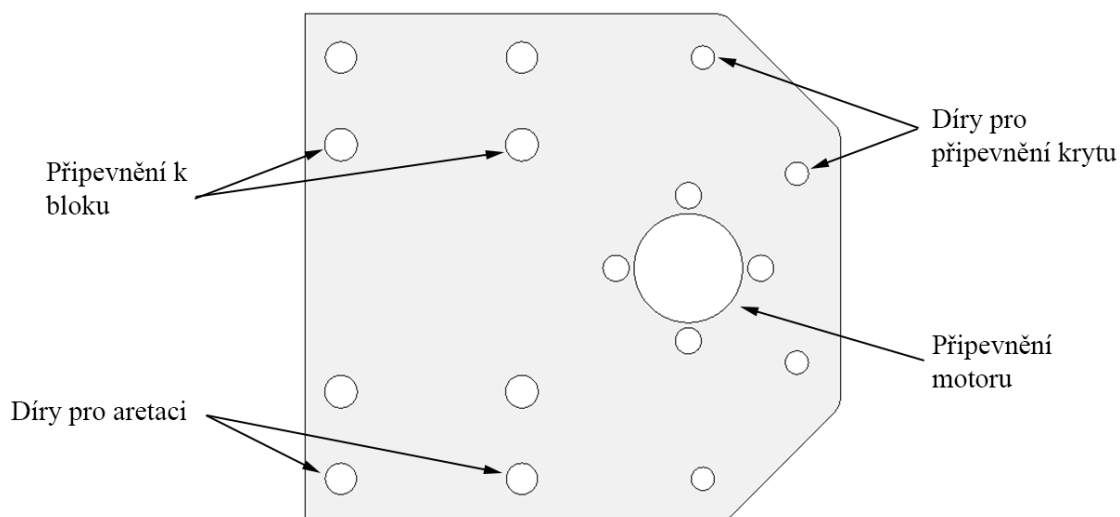


Obr. 24 Řez podsestavou pohonu

Ve spodní části podstavy se nachází blok pro napínání řemene. Blok obsahuje dva šrouby M5 se šestihrannou hlavou, které jsou z větší části zašroubovány do bloku. Tyto šrouby se při montáži zapřou hlavou o frézovanou plochu na těle kloubu a pomohou tak při montáži vyvinout sílu pro správné nastavení osové vzdálenosti řemenového převodu. Dále se v bloku pro napínání nachází závitové díry, ve kterých se budou dotahovat šrouby pro sevření hliníkového profilu.

7.4 Plech pohonu

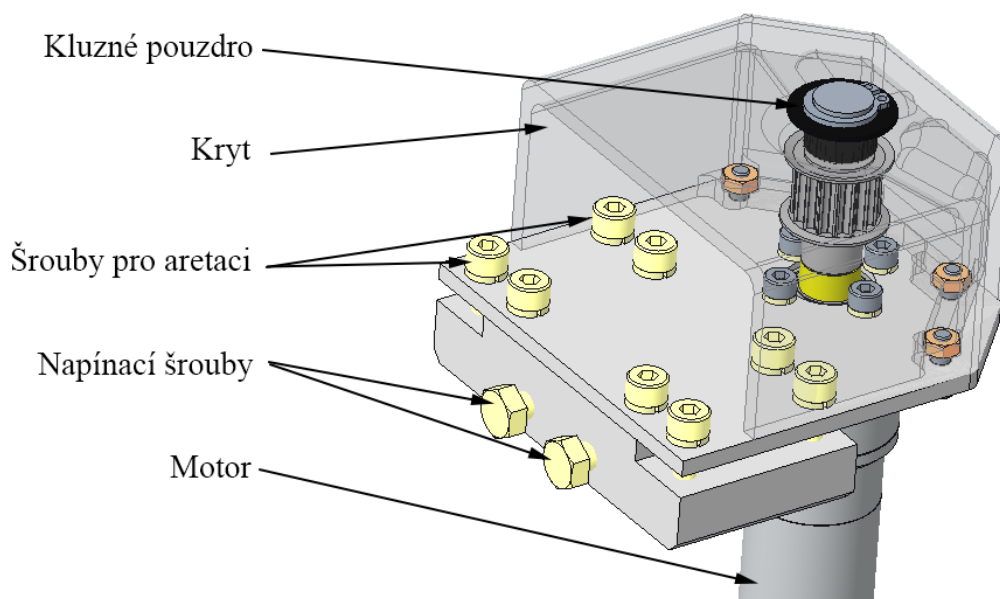
Plech pohonu slouží především k připojení motoru ke kloubu a aretaci osy pohonu vůči ose kloubu. Plech pohonu je vyroben z 3 mm silného hliníkového plechu. V levé části je osm děr pro šrouby M4, čtyři vnitřní slouží pouze pro připevnění bloku s napínacími šrouby. Vnější díry slouží pro šrouby vyvozující tlak mezi plechem a blokem napínání na plochy hliníkového U profilu. V pravé části plechu je otvor a čtyři díry k připevnění příruby motoru. Na okraji u zkosení jsou díry pro šrouby M3 k přišroubování krytu.



Obr. 25 Plech pohonu

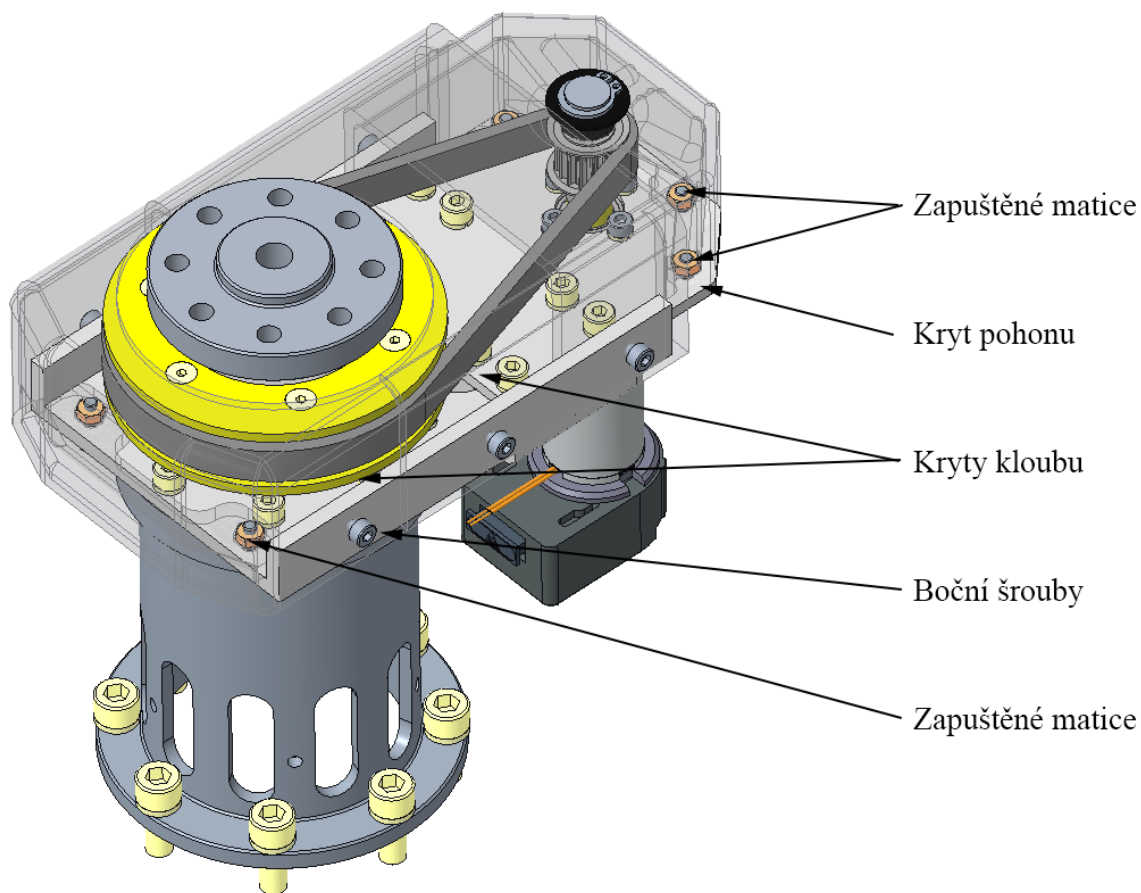
7.5 Krytování

Pro zvýšení bezpečnosti a zamezení vniku prachu a ostatních částic do mechanismu pohonu bylo vytvořeno krytování kloubu. Z důvodu snadné montáže bylo krytování celého kloubu rozděleno na tři jednotlivé kryty. Jelikož je možné měnit osovou vzdálenost pomocí napínacích šroubů, bylo potřeba zajistit, aby se spolu s pohonem mohl pohybovat nezávisle na zbytku krytování i jeho kryt. Proto byl kryt pohonu připevněn pouze k podstavě pohonu a při napínání se zasouvá pod ostatní kryty spolu s podstavou. Ve spodní části krytu jsou vytvořeny otvory pro zapuštění čtyř matic. Pomocí těchto matic je kryt připevněn k pohonu. Po sestavení krytu jsou matice v otvorech zalepeny.



Obr. 26 Podstava pohonu s krytem

Ostatní kryty jsou přišroubovány po obou stranách přímo do nosného hliníkového profilu pomocí šesti šroubů M3. Krajní kryt je k nosnému profilu ještě připevněn ve spodní části obdobným způsobem jako kryt pohonu.

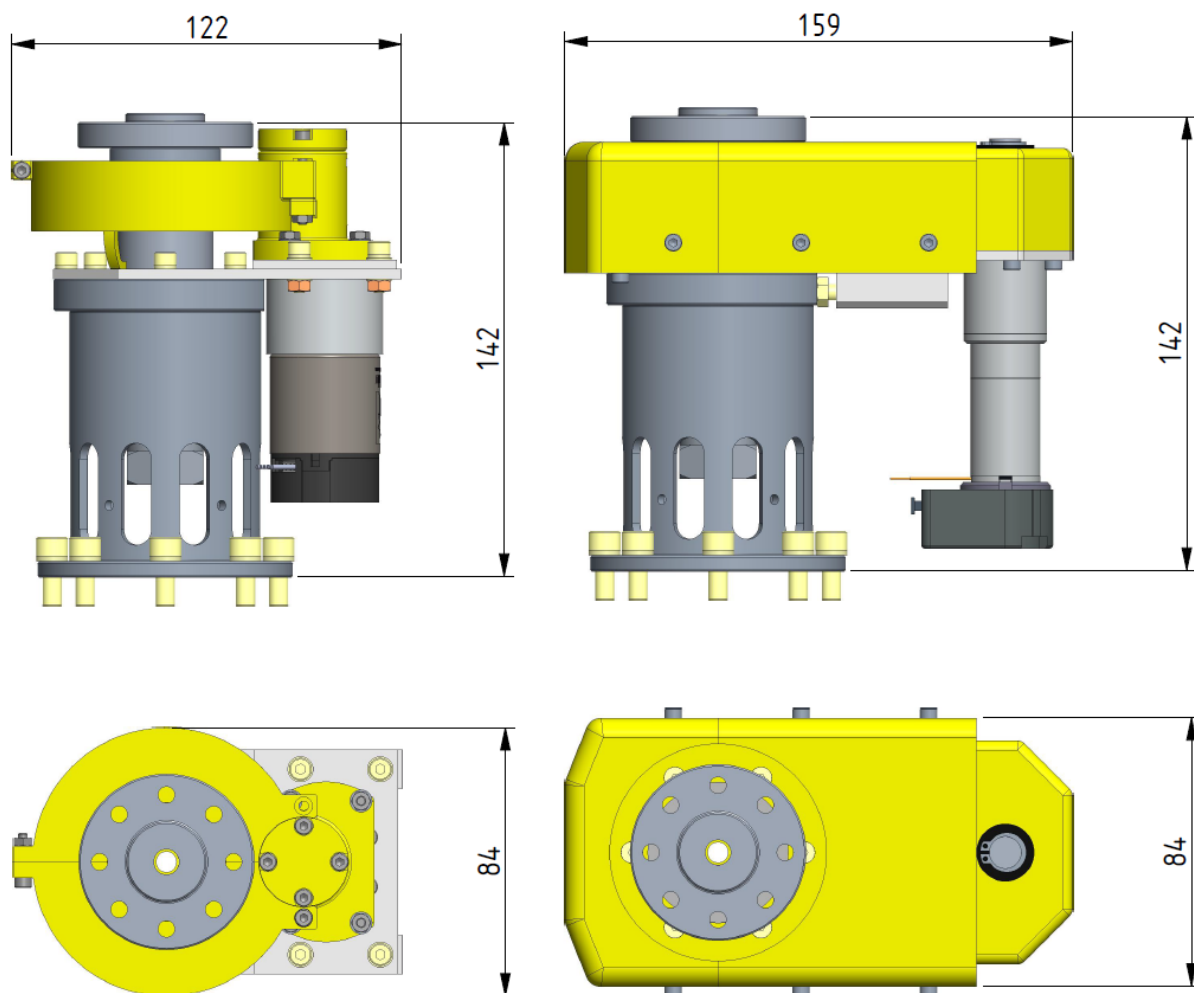


Obr. 27 Připevnění krytů kloubu

Všechny kryty jsou vyrobeny za pomoci 3D tisku. Jako materiál pro tisk byl zvolen plast PLA.

7.6 Porovnání původního a nového řešení

Po dokončení konstrukčního řešení byl nový kloub porovnán s původním řešením. Na Obr. 28 lze vidět, že nový a starý kloub mají shodnou výšku a šířku, na délku je nový kloub delší o 37 mm. Díky shodné výšce obou kloubů nedojde ke změně výšky pracovního prostoru manipulátoru. Další parametry obou řešení jsou uvedeny v Tab. 15.



Obr. 28 Porovnání původního a nového kloubu

Tab. 15 Parametry původního a nového řešení

Parametr	Původní kloub	Nový kloub
Osová vzdálenost	43 mm	90 mm
Hmotnost	1,97 kg	1,86 kg
Rozsah otáčení	$\pm 180^\circ$	$\pm 180^\circ$

8 Výpočty

V této kapitole jsou uvedeny návrhové a kontrolní výpočty.

8.1 Volba převodu

Pro volbu a výpočet vhodného řemenového převodu byla použita nadstavba MitCalc pro MS Excel. Velikost převodového poměru byla zvolena tak, aby bylo dosaženo co možná nejvyššího převodového poměru s minimálními zástavbovými rozměry. Po zadání všech vstupních parametrů, jako jsou otáčky a přenášený výkon, byl proveden návrh převodu. Maximální otáčky kloubu byly stanoveny z předchozí konstrukce na 10 min^{-1} .

Kapitola vstupních parametrů			
1.0 Způsob zatížení, pracovní parametry			
1.1 Jednotky výpočtu	SI Units (N, mm, kW...)		
1.2 Přenášený výkon	P	0.01	0.00 [kW]
1.3 Otáčky řemenice (požadované)	n	45	10 [/min]
1.4 Otáčky řemenice (skutečné)	n	45.0	10.0 [/min]
1.5 Převodový poměr požadovaný / skutečný	i	4.500	4.500
1.6 Krouticí moment	Mk	1.06	4.68 [Nm]
1.7 Typ hnacího stroje (zatížení)	B...S větší nerovnoměrností		
1.8 Typ poháněného stroje (zatížení)	C...S malou nerovnoměrností		
1.9 Denní zatížení převodu	A...Méně než 8 hodin		
1.10 Součinitel provozního zatížení	c2	1.4	1.4 <input checked="" type="checkbox"/>
1.11 Účinnost převodu	eta	98	[%]
3.0 Návrh a výpočet			
3.1 Vybraná šířka synchronního řemene	B	9 / 0.3543	[mm/in]
3.2 Počet zubů řemenice (průměr řemenice) - výběr	z	16 (15.28)	[mm]
3.3 Počet zubů řemenice	z	16	72
3.4 Výpočtový průměr řemenice	Dp	15.279	68.755 [mm]
3.5 Doporučená osová vzdálenost / min-max	C'	67.2	46 - 168 [mm]
3.6 Osová vzdálenost požadovaná / skutečná	C	90.00	88.98 [mm]
3.7 Počet zubů řemene (délka řemene) - výběr	z	60 (180)	[mm]
3.8 Počet zubů řemene / navržený	z	106	106 <input checked="" type="checkbox"/>
3.9 Délka řemene / rozteč	Lw/P	318.00	3.000 [mm]
3.10 Návrhový výkon	Pd	0.01	[kW]
3.11 Výkon přenesený řemenem	P'	0.02	[kW]
3.12 Přibližná celková hmotnost	m	0.11	[kg]
3.13 Součinitel využití řemene	SF	0.44	
3.14 Nestandardní řešení			
3.15 Použít normalizované řemenice	Ano		
3.16 Použít normalizované řemeny	Ano		

Obr. 29 Část výpočtů řemenového převodu v programu MitCalc

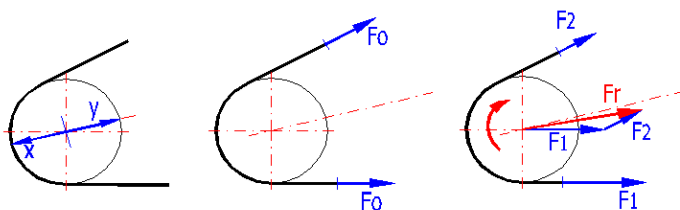
Jelikož řemenový převod přenáší relativně malý výkon, postačuje velikost řemene o rozteči 3 mm a šíři 9 mm. Velká řemenice má 72 zubů, malá 16 zubů. Výsledný převodový

poměr je tedy 4,5. Jako řemen byl zvolen 3M-318-9 HTD [24]. V průběhu výpočtu se ukázalo, že není zapotřebí zvyšovat úhel opásání malé řemenice za pomoci kladky. Díky tomu došlo ke značnému zjednodušení celé konstrukce.

?

Kapitola výsledků

4.0 Výsledky, koeficienty			
4.1 Koeficienty			
4.2 - Součinitel provozního zatížení	c2	1.40	
4.3 - Součinitel zrychlení	c3	0.00	
4.4 - Součinitel délky řemene	c5	1.00	
4.5 - Součinitel šířky řemene	c6	1.63	
4.6 - Součinitel počtu zubů v záběru	c1	1.00	
4.7 - Součinitel převodového poměru	c7	0.00	
4.8 - Úhel opásání řemenice	β	145.03	214.97 [°]
4.9 Osová přestavitelnost			
4.10 - Pro napínání řemene	x	0.80	[mm]
4.11 - Pro nasazení řemene	y	0.80	[mm]
4.12 Silové poměry, rychlost			
4.13 - Rychlost řemene / max. pro daný typ	v	0.04	45 [m/s]
4.14 Výpočet pracovních sil (obecně)			
4.15 - Síla v odlehčené větvi v % tahové síly		31.0	31.00 [✓] [%]
4.16 - Tahová síla	Fu	139	[N]
4.17 - Předpětí	Fo	113	[N]
4.18 - Síla v zatížené větvi řemenu	F1	182	[N]
4.19 - Síla v odlehčené větvi řemenu	F2	43	[N]
4.20 - Celková radiální síla na hřídel	Fr	219	[N]
4.21 Výpočet pracovních sil (Gates Rubber Company ®)			
4.22 - Celková radiální síla na hřídel	Fr	-	[N]
4.23 - Předpětí	Fo	-	[N]
4.24 Výpočet pracovních sil (firma ContiTech ®)			
4.25 - Koeficient	k1	1.25	1.25 [✓]
4.26 - Celková radiální síla na hřídel	Fr	166	[N]
4.27 - Předpětí	Fo	87	[N]

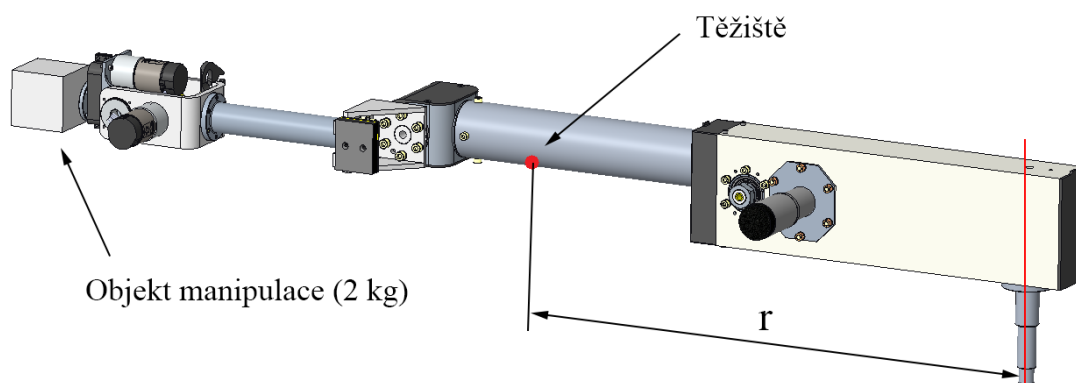


Obr. 30 Výsledky výpočtů řemenového převodu v programu MitCalc

8.2 Volba motoru

Pro volbu motoru bylo potřeba znát mechanické a dynamické vlastnosti celého manipulátoru a objektu manipulace, se kterými bude motor pohybovat. Mechanické parametry pohybujících se hmot byly zjištěny pomocí CAD programu PTC Creo 5.0 z 3D

modelu. Tyto parametry jsou uvedeny v Tab. 16. Na Obr. 31 je vyobrazena část vyloženého manipulátoru s objektem manipulace, poloha jeho těžiště je zvýrazněna červeným bodem.



Obr. 31 Vyložená část manipulátoru s objektem manipulace, pozice jeho těžiště

Tab. 16 Parametry manipulátoru s objektem manipulace

Popis	Hodnota
Moment setrvačnosti J	5,473 kg · m²
Vzdálenost těžiště od osy rotace r	577,5 mm

Jelikož veškeré klopné momenty od gravitačního působení na manipulátor jsou zachyceny pomocí páru kuličkových ložisek, pohon musí překonat pouze setrvačné účinky. Pohon kloubu bude tedy nejvíce zatížen při rozjezdu a maximálním vyložení manipulátoru s uchopeným objektem manipulace. Jelikož je manipulátor určen pro ovládání především obsluhou, uvažuje se maximální zrychlení 0,5 m.s⁻². Toto lineární zrychlení je přepočteno na zrychlení úhlové.

$$\varepsilon = \frac{a_m}{r} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{0,5}{0,57755} = 0,8657 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$$

Výpočet potřebného momentu pro překonání setrvačných sil byl proveden dle [19]:

$$M_p = J \cdot \varepsilon \quad (2)$$

$$M_p = 5,473 \cdot 0,8657 = 4,74 \text{ Nm}$$

Převodový poměr řemenového převodu je 4,5. Se známým převodovým poměrem byla provedena redukce pohybových parametrů na hřídel motoru dle [19]:

$$M_p' = \frac{M_p}{i} \quad (3)$$

$$M_p' = \frac{4,74}{4,5} = 1,05 \text{ Nm}$$

$$n' = n \cdot i \quad (4)$$

$$n' = 10 \cdot 4,5 = 45 \text{ min}^{-1}$$

Tyto výkonové parametry slouží jako vstupní data pro aplikaci Selection Program [18] k výběru motoru od společnosti Maxon. Pomocí této aplikace byla vybrána kombinace planetové převodovky, kartáčového DC motoru a enkodéru s číslem kombinace B7B8BCE47480. Parametry zvolené kombinace jsou uvedeny v Tab. 17. Zvolený motor je zobrazen na Obr. 32.

Tab. 17 Parametry vybraného motoru [20]

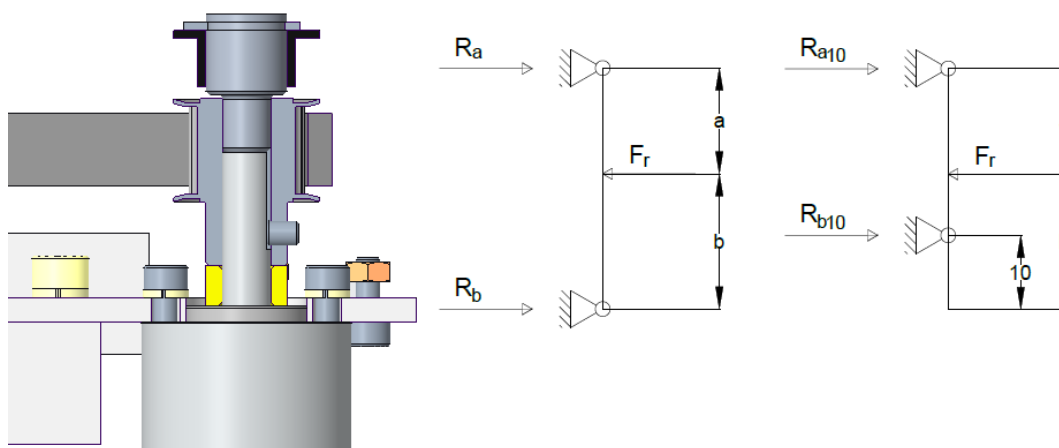
Parametr	Hodnota
Typ motoru	DC, kartáčový
Nominální napětí	12 V
Maximální proud	3,25 A
Otáčky na prázdkno	60 min ⁻¹
Maximální krouticí moment	4,6 Nm
Typ převodovky	Planetová
Vůle převodovky	1,1°
Převodový poměr	103:1
Cena	349,27 €



Obr. 32 Vybraný motor společnosti Maxon [20]

8.3 Kontrola hřídele motoru

Řemenový převod při přenosu výkonu působí radiální silou na řemenice, proto je potřeba zkontrolovat hřídel motoru, zda není nadměrně namáhána. Z výpočtu řemenového převodu je známá radiální síla F_r o velikosti 219 N. Tuto sílu porovnáváme s maximálním dovoleným radiálním zatížením planetové převodovky uvedeným v dokumentu s technickými daty zvoleného motoru od společnosti Maxon. Maximální dovolené zatížení je 150 N ve vzdálenosti 10 mm od příruby převodovky. Pro snížení velikosti radiální síly na převodovku je do řemenice vložena ještě druhá hřídel. Pro zjednodušení následujícího kontrolního výpočtu jsou obě hřídele brány jako jeden nosník se dvěma podporami a jednou zatěžující silou ve středu řemene.



Obr. 33 Schéma pro kontrolu hřídele motoru

Tab. 18 Vstupní hodnoty pro kontrolní výpočet hřídele

Parametr	Hodnota
F_r	219 N
a	9,9 mm
b	21,7 mm

Podpora A je umístěna do vzdálenosti 0,3 x šířka kluzného pouzdra a podpora B do středu ložiska v převodovce:

$$\sum M_a = 0 = F_r \cdot a - R_b \cdot (a + b) \quad (5)$$

$$R_b = \frac{F_r \cdot a}{a + b}$$

$$R_b = \frac{219 \cdot 9,9}{9,9 + 21,7} = 68,61 \text{ N}$$

Podpora A je umístěna do vzdálenosti 0,3 x šířka kluzného pouzdra a podpora B do vzdálenosti 10 mm od příruby převodovky:

$$\sum M_a = 0 = F_r \cdot a - R_{b10} \cdot (a + b - 10) \quad (6)$$

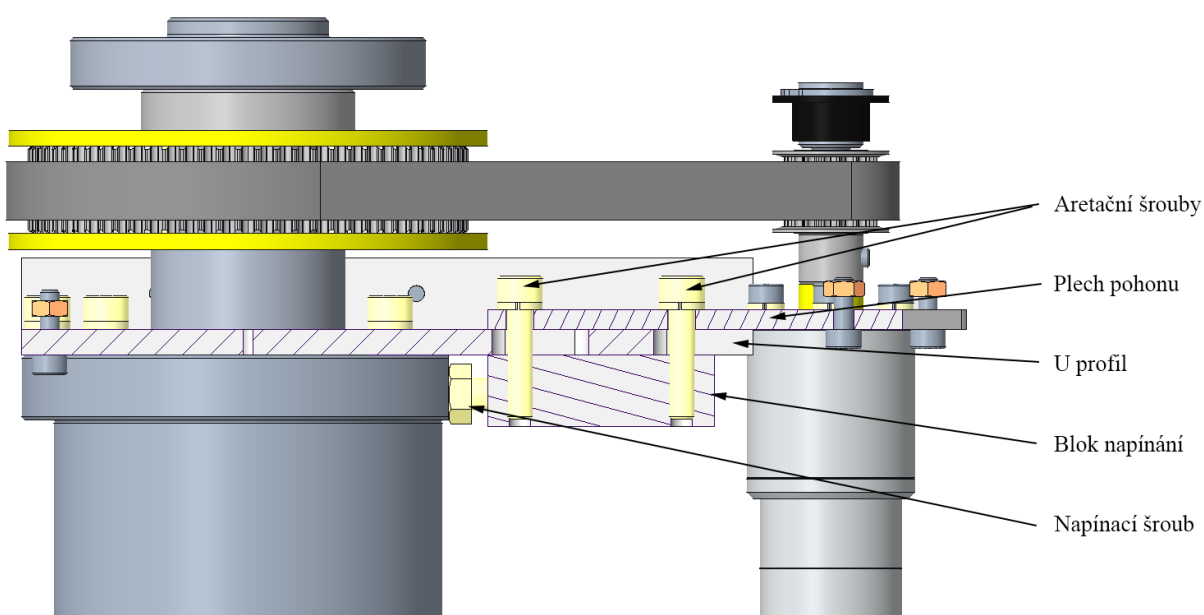
$$R_{b10} = \frac{F_r \cdot a}{a + b - 10}$$

$$R_{b10} = \frac{219 \cdot 9,9}{9,9 + 21,7 - 10} = 100,38 \text{ N}$$

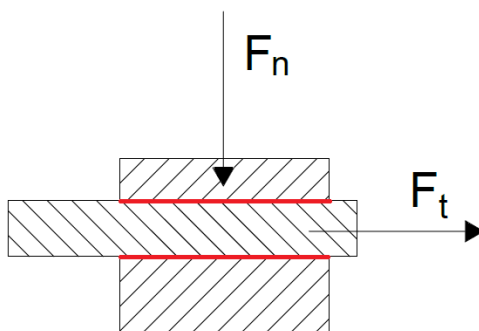
Výsledek radiální síly působící na hřídel planetové převodovky ani v jednom případě nepřesáhl maximální dovolené zatížení, a proto je možné použít tuto konstrukci.

8.4 Výpočet utahovacího momentu šroubů pro aretaci

Pro nastavení osové vzdálenosti řemenového převodu slouží napínací šrouby. Aretace této polohy řemene je řešena pomocí sevření hliníkového profilu mezi blokem napínání a horním plechem. Pro správnou funkci tohoto spoje musí spoj vytvořit třecí sílu, která odpovídá provozní síle řemenového převodu. Tato třecí síla F_t je závislá na normálové síle F_n a koeficientu tření f_t . Působení sil je znázorněno na Obr. 35, třecí plochy jsou zvýrazněny červeně. Potřebná normálová síla je vyvozena pomocí 4 šroubů M4. Pro vyvození potřebné síly byl spočten utahovací moment těchto šroubů. Šrouby jsou pojištěny proti uvolnění pomocí pružných podložek, jejich odpor je při výpočtu zanedbán. Z důvodu zajištění pevnosti a stability spoje byl zvolen koeficient bezpečnosti $k = 2$.



Obr. 34 Řez aretačními šrouby



Obr. 35 Zjednodušené schéma působení sil

Výpočet osově síly šroubu:

Tab. 19 Vstupní parametry pro výpočet osově síly

Parametr	Hodnota
Součinitel smykového tření (hliník – hliník) f_t [23]	1,05
Třecí síla F_t	219 N
Bezpečnost k	2

$$F_t = f_t \cdot F_n \quad (7)$$

$$F_n = \frac{k \cdot F_t}{f_t}$$

$$F_n = \frac{2 \cdot 219}{1,05} = 417,14 \text{ N}$$

K výpočtu utahovacího momentu jsou potřebné parametry metrického závitu M4x0,7. Parametry jsou uvedeny v Tab. 20.

Tab. 20 Parametry závitu M4x0,7 [21]

Parametr	Hodnota
Průměr d_2	3,545 mm
Rozteč P_h	0,7 mm
Úhel profilu závitu α	60°
Součinitel tření v závitu f_z [22]	0,3

Úhel stoupání závitu ψ dle [22]:

$$\psi = \arctan \frac{P_h}{\pi \cdot d_2} \quad (8)$$

$$\psi = \arctan \frac{0,7}{\pi \cdot 3,545} = 3,5965^\circ$$

Výpočet redukovaného třecího úhlu φ' dle [22]:

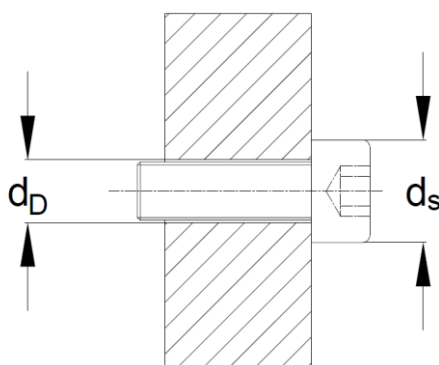
$$\varphi' = \arctan \frac{f_z}{\cos \frac{\alpha}{2}} \quad (9)$$

$$\varphi' = \arctan \frac{0,3}{\cos \frac{60}{2}} = 19,1066^\circ$$

Výpočet středního průměru stykové plochy D_s dle [22]:

Tab. 21 Parametry šroubového spoje

Parametr	Hodnota
Průměr díry d_D	4,3 mm
Průměr hlavy šroubu d_s	7 mm
Součinitel smykového tření pod hlavou šroubu f [23]	0,61



Obr. 36 Rozměry šroubového spoje

$$D_s = \frac{d_s + d_D}{2} \quad (10)$$

$$D_s = \frac{7 + 4,3}{2} = 5,65 \text{ mm}$$

Výpočet utahovacího momentu dle [22]:

$$M_u = F_n \cdot \tan(\psi + \varphi') \cdot \frac{d_2}{2} + F_n \cdot f \cdot \frac{D_s}{2} \quad (11)$$

$$M_u = 417,14 \cdot \tan(3,597 + 19,107) \cdot \frac{3,545}{2} + 417,14 \cdot 0,61 \cdot \frac{5,65}{2} = 1028,19 \text{ Nmm}$$

Pro udržení podstavy pohonu v seřazené poloze musí být aretační šrouby dotaženy utahovacím momentem alespoň 1 Nm.

9 Závěr

Pro snadnější vykonávání jednotlivých soutěžních úloh, a tím i dosažení lepšího bodového ohodnocení na soutěži, byla stávající konstrukce prvního kloubu manipulátoru upravena tak, aby se zmenšila jeho úhlová vůle, což bylo cílem práce.

Bylo analyzováno současné konstrukční řešení, ve kterém je přenos výkonu z motoru na kloub zajištěn pomocí ozubeného soukolí. Následně byla provedena rešerše konstrukčních řešení obdobných systémů, které se používají na konkurenčních roverech a v průmyslových aplikacích. V rešerši byly přezkoumány celkem čtyři různé systémy.

Pro získání přehledu o dostupných pohonech byl proveden průzkum aktuálních dodavatelů pohonů se zpětnou vazbou. Od čtyř dodavatelů byly vybrány pohony v určeném výkonovém rozsahu. Na základě analýzy současného stavu byl sestaven požadavkový list.

Byly navrženy tři varianty řešení kloubu. Každá varianta využívá jiného druhu převodu krouticího momentu na osu kloubu, a to pomocí čelního ozubení, šnekového převodu a převodu s ozubeným řemenem. Jednotlivé varianty byly rozpracovány do takového rozsahu, aby je bylo možno porovnat. K porovnání variant byla využita vícekritériální analýza. Pro provedení analýzy bylo stanoveno pět kritérií. Na základě výsledků kritériální analýzy je vítězná varianta s použitím ozubeného řemene. Tato varianta byla dále detailně rozpracována.

Bylo vytvořeno vlastní konstrukční řešení, které spočívá v použití nového motoru se zpětnou vazbou od společnosti Maxon. Na motoru je osazena ozubená řemenice s 16 zuby a na hřídeli kloubu je řemenice se 72 zuby. Pohonná jednotka je připevněna k tělu kloubu prostřednictvím upraveného hliníkového U profilu. Toto řešení umožňuje seřízení osové vzdálenosti převodu pro snadnou montáž a zajištění správného napnutí řemene. Součástí řešení je také krytování celého kloubu. Toto krytování je navrženo z plastu PLA a vyrobeno pomocí 3D tisku. Všechny nové díly jsou navrženy z hliníku a plastu pro zajištění jejich nízké hmotnosti.

Práce je doložena návrhovými a kontrolními výpočty. Konstrukční řešení bylo vytvořeno v CAD programu Creo Parametric a byla vytvořena výkresová dokumentace všech obráběných dílů.

Seznam použité literatury

- [1] HECZKO, Dominik. Návrh levného manipulátoru pro mobilní robot [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2019-10-14]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/129340>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [2] ITU Rover Team / URC 2019 SAR (Extended) [online]. 2019 [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://youtu.be/Yzazuq1nFQ8>
- [3] Cornell Mars Rover - URC SAR 2019 [online]. 2019 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://youtu.be/KvGK0PksWZA>
- [4] AGH Space Systems - European Rover Challenge 2019 [online]. 2019 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://youtu.be/nXN6dIOQMjE>
- [5] Foto URC 2019 [online]. In: . 2019 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://photos.google.com/share/AF1QipMqB5hNv9T6-XT-M8eTPpFnOBfbHwmCcYopsICPvSL8X0Pnh88Wtl91ah9EehP5vw/photo/AF1QipPg8XwuzbiOVWGSE3-jdiuvf7mQEk28cOxbW0S-?key=RVE0N1lfOU05LXNVLTk0aHIwMXRmQ2hJM0RJYlIR>
- [6] Igus - robolink D High End robot joint [online]. 2019 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://www.igus.cz/product/1406>
- [7] Rotační enkodér [online]. In: PAŠTYKA, Jan a Ondřej HRUŠKA. 2017, 30.04.2017, s. 2-3 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: https://embedded.fel.cvut.cz/sites/default/files/kurzy/lpe/rotary_encoder/Rotary_Encoder.pdf
- [8] Servocity - What We Do [online]. 2019 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: <https://www.servocity.com/what-we-do>
- [9] Servocity - 52 RPM Premium Planetary Gear Motor [online]. 2019 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: <https://www.servocity.com/52-rpm-premium-planetary-gear-motor-w-encoder>
- [10] Maxon - About maxon [online]. 2019 [cit. 2019-10-12]. Dostupné z: <https://www.maxongroup.com/maxon/view/content/company>
- [11] Konfigurace Maxon [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.maxongroup.com/maxon/view/configurator/?ConfigID=B7B8FAE0124E>
- [12] Pololu - About Pololu [online]. 2019 [cit. 2019-10-12]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/about>
- [13] Pololu - 131:1 Metal Gearmotor 37Dx73L mm 12V with 64 CPR Encoder [online]. 2019 [cit. 2019-10-12]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/4756>
- [14] Dunkermotoren - Company [online]. 2019 [cit. 2019-10-13]. Dostupné z: <https://www.dunkermotoren.com/en/company/>

-
- [15] Dunkermotoren - G30.0 [online]. 2019 [cit. 2019-10-13]. Dostupné z: <https://konfigurator.dunkermotoren.de/docs/MKS/8862008029.pdf>
- [16] Dunkermotoren - PLG 30 [online]. 2019 [cit. 2019-10-13]. Dostupné z: <https://konfigurator.dunkermotoren.de/docs/MKS/8885002207.pdf>
- [17] Dunkermotoren – RE 30-2-500 [online]. 2019 [cit. 2019-10-13]. Dostupné z: <https://konfigurator.dunkermotoren.de/docs/MKS/docs/MKS/8871005030.pdf>
- [18] Selection Program - Maxon. Maxon [online]. [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.maxongroup.com/maxon/view/msp/>
- [19] SKAŘUPA, Jiří. Průmyslové roboty a manipulátory. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, [2007]. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [20] Konfigurace - Maxongroup. Maxon [online]. [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.maxongroup.com/maxon/view/configurator/?ConfigID=B7B8BCE47480>
- [21] ČSN ISO 724 (01 4013). Metrické závity ISO pro všeobecné použití - Základní rozměry. Český normalizační institut, 2005.
- [22] KALÁB, Květoslav. Části a mechanismy strojů. Ostrava, 2016.
- [23] Součinitel tření - Ekonstrukter. E-konstrukter [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>
- [24] Ozubený řemen 3M-318-9 HTD ContiTech [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/produkty/ozubene-remeny/htd/3m/3m-318-9-htd-contitech/>

Seznam obrázků

Obr. 1 Manipulátor robotu K3P4	12
Obr. 2 Rover K3P4	12
Obr. 3 Řez prvním kloubem	13
Obr. 4 Motor Pololu Metal Gearmotor 37Dx73L [1]	14
Obr. 5 Zapojení kontroleru [1].....	15
Obr. 6 Rozklad šnekového mechanismu kloubu [2].....	16
Obr. 7 Manipulátor roveru Artemis [3]	17
Obr. 8 Detail mechanismu kloubu [5]	17
Obr. 9 Robolink, D standard robot joint [6]	18
Obr. 10 Detail kódovacího kolečka inkrementálního rotačního enkodéru [7].....	19
Obr. 11 Motor Servocity 52 RPM Premium Planetary Gear Motor [9]	20
Obr. 12 Motor a převodovka Maxon [11].....	21
Obr. 13 Motor společnosti Pololu [13]	22
Obr. 14 Motor a převodovka Dunkermotoren [15].....	23
Obr. 15 Sestava varianty s čelním ozubením.....	25
Obr. 16 Řez pohonem varianty s čelním ozubením.....	26
Obr. 17 Varianta se šnekovým převodem.....	27
Obr. 18 Řez sestavou pohonu	27
Obr. 19 Varianta s použitím ozubeného řemene.....	28
Obr. 20 Vedení řemene	29
Obr. 21 Vítězná varianta	32
Obr. 22 Řez celým kloubem	33
Obr. 23 Upravený U profil.....	34
Obr. 24 Řez podsestavou pohonu	35
Obr. 25 Plech pohonu	36
Obr. 26 Podsestava pohonu s krytem.....	36
Obr. 27 Připevnění krytů kloubu	37
Obr. 28 Porovnání původního a nového kloubu	38
Obr. 29 Část výpočtů řemenového převodu v programu MitCalc.....	39
Obr. 30 Výsledky výpočtů řemenového převodu v programu MitCalc	40

Obr. 31 Vyložená část manipulátoru s objektem manipulace, pozice jeho těžiště	41
Obr. 32 Vybraný motor společnosti Maxon [20].....	42
Obr. 33 Schéma pro kontrolu hřídele motoru	43
Obr. 34 Řez aretačními šrouby	44
Obr. 35 Zjednodušené schéma působení sil.....	45
Obr. 36 Rozměry šroubového spoje	46

Seznam tabulek

Tab. 1 Parametry Pololu Metal Gearmotor 37Dx73L [1].....	14
Tab. 2 Parametry kontroleru VNH5019 [1].....	15
Tab. 3 Základní parametry manipulátoru [2].....	16
Tab. 4 Parametry Robot joint [6].....	18
Tab. 5 Parametry Servocity 52 RPM Premium Planetary Gear Motor [9].....	20
Tab. 6 Parametry motoru Maxon [11]	21
Tab. 7 Parametry motoru Pololu [13]	22
Tab. 8 Parametry motoru společnosti Dunkermotoren [15]	23
Tab. 9 Porovnávání kritéria.....	30
Tab. 10 Stupnice hodnocení.....	30
Tab. 11 Významnost jednotlivých kritérií	31
Tab. 12 Hodnocení varianty s ozubeným převodem	31
Tab. 13 Hodnocení varianty se šnekovým převodem.....	32
Tab. 14 Hodnocení varianty s použitím řemene	32
Tab. 15 Parametry původního a nového řešení.....	38
Tab. 16 Parametry manipulátoru s objektem manipulace.....	41
Tab. 17 Parametry vybraného motoru [20].....	42
Tab. 18 Vstupní hodnoty pro kontrolní výpočet hřídele.....	43
Tab. 19 Vstupní parametry pro výpočet osově síly	45
Tab. 20 Parametry závitu M4x0,7 [21].....	45
Tab. 21 Parametry šroubového spoje.....	46

Přílohy

Příloha A: 3D model v programu PTC Creo Parametric 5.0

Příloha B: Výkresová dokumentace

Příloha C: Bakalářská práce ve formátu DOCX